

## OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TETOS FLUTUANTES TIPO PONTÃO

Carolina de Carvalho Bethlem

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Rio de Janeiro  
Setembro de 2017

# OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TETOS FLUTUANTES TIPO PONTÃO

Carolina de Carvalho Bethlem

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Theodoro Antoun Netto, Ph.D.

---

Prof. Marta Cecilia Tapia Reyes, D.Sc.

---

Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2017

Bethlem, Carolina de Carvalho

Otimização Estrutural de Tetos Flutuantes Tipo Pontão/  
Carolina de Carvalho Bethlem – Rio de Janeiro:  
UFRJ/COPPE, 2017.

XIV, 72 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 68-72.

1. Tetos Flutuantes. 2. Otimização. 3. Tanques de  
Armazenamento. I. Netto, Theodoro Antoun. II. Universidade  
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia  
Oceânica. III. Título.

À minha família,  
a base de tudo.

# Agradecimentos

Aos meus pais, por me apoiarem em tudo, acreditarem em mim e não me deixarem desistir.

Aos meus amigos que compreenderam a falta de tempo, por deixarem mais leves os tempos de descanso.

Ao Bruno, que chegou agora, mas já é essencial com todo o apoio e carinho que me dá.

À Marta, que sempre foi um anjinho da guarda na minha vida acadêmica, pela amizade e dedicação que tem por mim e por todos à sua volta.

Ao Kaleff, por partilhar comigo um pouco de sua enorme sabedoria.

À Sandra, pela eterna boa vontade e por todo bom humor e carinho nesses anos todos.

E, por fim, ao Theodoro, pela orientação, por toda a paciência e pelas broncas necessárias.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TETOS FLUTUANTES TIPO PONTÃO

Carolina de Carvalho Bethlem

Setembro/2017

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Programa: Engenharia Oceânica

Tanques de armazenamento são equipamentos de extrema importância nas unidades de processamento de petróleo e derivados. Um dos tipos de tanque de armazenamento mais utilizados é o tanque cilíndrico vertical com teto flutuante externo. Esses tetos são estruturas formadas por chapas finas de aço, que são sustentadas pela superfície do produto armazenado no tanque durante a operação.

Não há muita atenção ao projeto dessas estruturas e a análise de dados de tetos existentes indicou que poderia ser possível a redução do peso total do teto através de estudos mais aprofundados. A redução de peso de aço é significativa para o custo total desses equipamentos, visto que podem chegar a ter 100 metros de diâmetro. Essa foi a motivação para este trabalho, que teve como objetivo a otimização estrutural de tetos flutuantes do tipo pontão. Os resultados apresentados visam a auxiliar no dimensionamento dos tetos durante a fase inicial de projeto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## STRUCTURAL OPTIMIZATION OF PONTOON FLOATING ROOF

Carolina de Carvalho Bethlem

September/2017

Advisor: Theodoro Antoun Netto

Department: Oceanic Engineering

Storage tanks are logistically important in oil processing units. One of the most widely used types of storage tank is the vertical cylindrical tank with external floating roof. Thin steel plates form these structures, which float directly on the product stored in the tank.

There is not much design data regarding floating roofs and data analysis of the existing ones indicated that structural weight might be reduced and need further studies. Steel weight reduction can significantly decrease equipment's cost, since some floating roofs have 100 meters of diameter. Motivated by diminishing structural weight, this work aims to optimize the structure of pontoon floating roofs. The results achieved may help floating roof's initial design.

# Sumário

1	Introdução.....	1
2	Otimização.....	4
2.1	Métodos de Otimização .....	6
2.1.1	Métodos Determinísticos .....	7
2.1.2	Métodos Heurísticos .....	9
3	Tanques de Armazenamento.....	13
3.1	Acessórios de Tanques de Armazenamento.....	23
4	Tetos Flutuantes .....	32
5	Otimização de Tetos Flutuantes .....	39
5.1	Forma Geral do Teto .....	39
5.2	Reforços e Pernas .....	52
6	Resultados.....	53
6.1	Forma Geral do Teto .....	53
6.2	Reforços e Pernas .....	63
7	Conclusões.....	65
7.1	Trabalhos Futuros.....	66
8	Referências Bibliográficas .....	68



# Lista de Figuras

Figura 3-1 – Visão Geral de um Tanque de Armazenamento .....	13
Figura 3-2 – Parque de Armazenamento (Fonte: [27]).....	14
Figura 3-3 – Tanque Esférico (Fonte: [28]) .....	15
Figura 3-4 – Tanque de Fundo Cônico (Fonte: [29]) .....	15
Figura 3-5 – Tanque Cilíndrico Vertical (Fonte: [30]).....	16
Figura 3-6 – Volume Morto para Diferentes Diâmetros .....	17
Figura 3-7 – Tanque com Teto Cônico (Fonte: [34]) .....	19
Figura 3-8 – Tanque com Teto Curvo (Fonte: [34]) .....	19
Figura 3-9 – Teto Flutuante Interno (Fonte: [35]) .....	21
Figura 3-10 – Tanque com Teto Flutuante do Tipo Duplo (Fonte: [36]).....	21
Figura 3-11 – Tanque com Teto Flutuante do Tipo Pontão (Fonte: [36]).....	22
Figura 3-12 – Bocas de Visita em Teto Flutuante (Vista Geral).....	24
Figura 3-13 – Bocas de Visita em Teto Flutuante (Detalhes) .....	25
Figura 3-14 – Misturadores em Hélice (Vista Geral e Detalhe) .....	26
Figura 3-15 – Escada do Teto Flutuante .....	28
Figura 3-16 – Trilhos da Escada do Teto Flutuante .....	29
Figura 3-17 – Selo de Vedação .....	29
Figura 3-18 – Dreno em Teto Flutuante .....	30
Figura 3-19 – Sistema de Drenagem com Juntas Flexíveis (Fonte: [37]) .....	30
Figura 3-20 – Sistema de Drenagem com Mangueira Flexível.....	30
Figura 3-21 – Pernas de Sustentação.....	31
Figura 3-22 – Guia Antirrotacional de Medição e Amostragem .....	31
Figura 4-1 – Tanque com Teto Flutuante Externo em Construção .....	32
Figura 4-2 – Condição Normal de Flutuação.....	34
Figura 4-3 – Condição de Alagamento 1: Carga de 250 mm de Água .....	34
Figura 4-4 – Condição de Alagamento 2: Dois Compartimentos Alagados .....	34
Figura 4-5 – Teto Flutuante Pontoon com Lençol Central Alagado .....	35
Figura 4-6 – Manutenção: Pernas Apoiadas .....	35
Figura 5-1 – Dimensões Principais do Pontoon .....	39
Figura 5-2 – Dimensões do Pontão.....	41
Figura 5-3 – Flambagem do Pontão.....	47
Figura 5-4 – Eixos X e Y Considerados no Cálculo da Inércia do Pontão (Ref. [40]) ..	48
Figura 5-5 – Fluxograma.....	50
Figura 6-1 – Resultados com todas as Soluções do Algoritmo .....	54
Figura 6-2 – Resultados dos Pontos Ótimos Finais .....	54

Figura 6-3 – Comprimento do Pontão vs. Raio do Teto .....	55
Figura 6-4 – Altura do Rim Externo vs. Raio do Teto .....	56
Figura 6-5 – Altura do Rim Interno vs. Raio do Teto .....	57
Figura 6-6 – Declividade do Fundo vs. Raio do Teto.....	58
Figura 6-7 – Número de Anteparas Radiais vs. Raio do Teto .....	59
Figura 6-8 – Peso do Teto vs. Raio do Teto.....	60

# Lista de Tabelas

Tabela 3-1 – Classificação de Tanques de Armazenamento quanto à Capacidade ....	17
Tabela 3-2 – Seleção de Tipo de Teto Flutuante Externo .....	23
Tabela 6-1 – Parametrização das Variáveis Livres .....	53
Tabela 6-2 – Restrições Ativas .....	60
Tabela 6-3 – Comparação sem Redução de Peso.....	62
Tabela 6-4 – Comparação com Redução de Peso.....	62

# Lista de Símbolos

$D_{tanque}$ : Diâmetro do tanque de armazenamento, em m.

$\gamma_{prod}$ : Peso Específico do produto armazenado no tanque, em kgf/m<sup>3</sup>.

$\gamma_{min}$ : Peso Específico do produto armazenado no tanque, em kgf/m<sup>3</sup>.

$\gamma_{aço}$ : Peso Específico do material do teto (aço), em kgf/m<sup>3</sup>.

$\gamma_{água}$ : Peso Específico da água acumulada no lençol central, em kgf/m<sup>3</sup>.

$h_{água}$ : Altura da água acumulada no lençol central, em m.

$g$ : Aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>.

$E$ : Módulo de Elasticidade, em MPa.

$\nu$ : Coeficiente de Poisson.

$G_t$ : Módulo de Elasticidade Transversal, em MPa.

$D_{teto}$ : Diâmetro do teto flutuante, em m.

$esp_{CT}$ : Espaçamento entre o costado do tanque e o teto flutuante, em m.

$L_p$ : Comprimento do pontão, em m.

$h_a$ : Distância vertical entre a parte inferior do rim externo do *pontoon* e a parte inferior do rim interno do *pontoon*, em m.

$h_b$ : Distância vertical entre a parte inferior do rim interno do *pontoon* e o lençol central, em m.

$h_c$ : Distância vertical entre a parte superior do rim externo do *pontoon* e a parte superior do rim interno do *pontoon*, em m.

$h_d$ : Distância vertical entre a parte superior do rim interno do *pontoon* e o lençol central, em m.

$decl_{topo}$ : Declividade do topo do pontão.

$decl_{fundo}$ : Declividade do fundo do pontão.

$R_1$ : Raio do rim externo do pontão, em m.

$R_2$ : Raio do rim interno do pontão ou raio do lençol central, em m.

$H_{R_{int}}$ : Altura do rim interno do pontão, em m.

$H_{R_{ext}}$ : Altura do rim externo do pontão, em m.

$\beta_{max}$ : Ângulo máximo de adernamento do teto, em graus.

$N$ : Número de anteparas radiais do *pontoon*.

$\beta$ : Ângulo de adernamento na condição de perda de estanqueidade de dois compartimentos contíguos do pontão, em graus.

$t_{LC}$ : Espessura do chapeamento do lençol central, em mm.

$t_{fundo}$ : Espessura do chapeamento do fundo do *pontoon*, em mm.

$t_{topo}$ : Espessura do chapeamento do topo do *pontoon*, em mm.

$t_{R_{int}}$ : Espessura do chapeamento do rim interno do *pontoon*, em mm.

$t_{R_{ext}}$ : Espessura do chapeamento do rim externo do *pontoon*, em mm.

$t_{ant\_rad}$ : Espessura do chapeamento das anteparas radiais do *pontoon*, em mm.

$h_1$ : Calado na condição normal de flutuação, em m.

$h_2$ : Calado paralelo equivalente da condição anormal de flutuação com alagamento do lençol central e de dois compartimentos contíguos do pontão, em m.

$h_{2\beta}$ : Calado Máximo na condição anormal de flutuação com alagamento do lençol central e de dois compartimentos contíguos do pontão, após correção de banda, em m.

$h_3$ : Calado na condição anormal de flutuação com alagamento do lençol central por água pluvial, em m.

$h_{max}$ : Máximo calado permitido para todas as condições de flutuação, em m.

$W_{teto}$ : Peso do teto, em kgf.

$V_a$ : Volume correspondente à altura  $h_a$ , em m<sup>3</sup>.

$V_b$ : Volume correspondente à altura  $h_b$ , em m<sup>3</sup>.

$V_c$ : Volume correspondente à altura  $h_c$ , em m<sup>3</sup>.

$V_d$ : Volume correspondente à altura  $h_d$ , em m<sup>3</sup>.

$x_0$ : Distância entre o centro do teto e o centro de flutuação do teto após a perda de estanqueidade de dois compartimentos contíguos do pontão, em m.

$\theta$ : Ângulo entre duas anteparas radiais contíguas do pontão, em rad.

$A$ : Área do plano de flutuação do pontão, em m<sup>2</sup>.

$I_{yy}$ : Inércia de linha d'água do pontão após a perda de estanqueidade de dois compartimentos contíguos, em m<sup>4</sup>.

$y_{LC}$ : Deflexão da membrana, em m.

$q$ : Pressão sobre a membrana, em MPa.

$h_{LC}$ : Calado otimizado do lençol central, em m.

$\sigma$ : Tensão na periferia da membrana, em MPa.

$K_1$ : Coeficiente da fórmula de Roark = 0,00.

$K_2$ : Coeficiente da fórmula de Roark = 3,44.

$K_3$ : Coeficiente da fórmula de Roark = 0,00.

$K_4$ : Coeficiente da fórmula de Roark = 0,75.

# 1 Introdução

Tanques de armazenamento são largamente utilizados para estocagem de petróleo e seus derivados, havendo milhares em operação apenas na indústria brasileira.

Apesar de aparentemente simples, esses equipamentos apresentam altos custos de construção e manutenção, além dos riscos relacionados à armazenagem de grandes quantidades de óleo.

Têm grande importância logística nas etapas de produção, refino e distribuição, sendo sua capacidade de armazenamento uma das características críticas de uma unidade operacional. Dependendo do caso, há tanques com capacidades de 16 m<sup>3</sup> ou até tanques que ultrapassam os 90.000 m<sup>3</sup> de volume.

Esses tanques variam muito não só quanto ao tamanho: há uma grande variedade de formatos e tipos de instalação encontrados na indústria. No capítulo 3, é feita a apresentação dos tanques de armazenamento, indicando os tipos existentes e descrevendo as características básicas de operação.

Para os tanques atmosféricos cilíndricos verticais, uma variação comum para armazenagem de produtos mais leves é o teto flutuante. Sua principal característica é ser sustentado diretamente pela superfície do produto armazenado no tanque. No capítulo 3 há também a descrição dos tipos de tetos flutuantes existentes.

No universo da literatura sobre tanques de armazenamento, encontrou-se pouco enfoque no projeto estrutural de tetos flutuantes. O assunto é normalmente abordado como parte do projeto do tanque de armazenamento como um todo e não há tentativa de otimização estrutural. Como há diversos registros de falhas em tetos flutuantes [1] [2], induz-se que a atenção aos cálculos estruturais dos tetos na etapa de projeto pode estar aquém do necessário para a segurança da operação.

Para o projeto dos tetos, as regras existentes são amplas e genéricas, deixando muitos parâmetros a critério do projetista. Como consequência, não há uma sistemática de projeto e o resultado prático são tetos flutuantes das mais diversas configurações geométricas e estruturais. Comparando características de diversos tetos reais, observou-se essa falta de padrão, em que as dimensões gerais do teto e, conseqüentemente, seu peso não têm relação aparente com o seu diâmetro externo.

A tendência para tanques de armazenamento de diâmetros maiores que 20 metros é o teto flutuante do tipo pontão, que é o objeto de estudo deste trabalho. O capítulo 4 foca no projeto de tetos tipo pontão. Nele, são descritos os acessórios necessários à sua

operação, assim como a operação do teto em si. Além disso, são apresentadas as regras e restrições aplicáveis e uma revisão dos estudos existentes sobre tetos flutuantes. As regras aplicáveis estabelecem as restrições mínimas necessárias enquanto os estudos referentes a projeto de tetos flutuantes fornecem boas ferramentas para a representação e o cálculo estrutural do teto.

Portanto, optou-se nesse trabalho por desenvolver uma metodologia de otimização estrutural desses tetos *pontoon*, para auxílio no projeto de tanques de armazenamento.

O capítulo 2 foca em métodos de otimização, apresentando uma breve descrição de alguns dos principais métodos existentes. Discutiram-se também as abordagens encontradas na literatura e as dificuldades do estudo de otimização estrutural.

Cada método de otimização tem melhor aplicação em um tipo de problema e é importante dosar corretamente o nível de complexidade com o tempo de processamento para as necessidades do projetista. Isto é, a escolha do tipo de algoritmo a ser utilizado nas etapas de otimização estrutural é fundamental para a eficiência do estudo. O aprofundamento das características dos tetos flutuantes e dos métodos de otimização existentes visa à seleção de um método adequado para o problema.

A partir da revisão bibliográfica citada acima, determinou-se que a otimização de tetos tipo pontão pode ser dividida em duas etapas. A primeira delas consiste na otimização da forma geral do teto, definindo suas dimensões principais, enquanto a segunda se concentra na otimização dos reforços do lençol central e da disposição das pernas de sustentação para manutenção.

Para a primeira etapa de otimização estrutural do teto flutuante, optou-se pelo uso de um método determinístico de otimização chamado GRG não linear. Como a otimização da forma geral do teto pode ser feita através de fórmulas analíticas, a utilização de um método mais simples acelerou o processo. A segunda etapa exige a incorporação da análise estrutural, feita através de modelos em elementos finitos. A otimização foi feita através da ferramenta interna ao programa. Mais detalhes do processo de otimização de tetos tipo pontão estão no capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos da otimização dos tetos flutuantes. Como o objetivo deste estudo é genérico, não havendo um projeto específico a que se destina, optou-se por um estudo paramétrico das dimensões gerais do teto. Portanto, na primeira etapa, a otimização foi feita para diversos diâmetros de tanque de armazenamento, dentro da faixa daqueles dos tanques existentes. Como resultado, foram fornecidos gráficos com as dimensões otimizadas de tetos flutuantes em função do raio externo do



*pontoon*. Em seguida, é feita uma comparação entre um teto *pontoon* existente e o otimizado de mesmo diâmetro.

A segunda etapa consiste em otimizar os reforços e números de pernas do teto. A otimização nesse caso não pode ser generalizada, devendo ser otimizado um teto específico, levando em conta os requisitos de projeto do teto e do tanque do qual faz parte. Nos capítulos 5 e 6 são apresentadas as considerações necessárias e as limitações encontradas para essa etapa de otimização.

## 2 Otimização

Otimização consiste em selecionar a melhor solução, dentro de uma faixa de possibilidades, visando encontrar aquela que forneça o máximo benefício segundo algum critério. Isso pode ser traduzido em maximizar ou minimizar uma função objetivo, geralmente sujeita ou não a um conjunto de restrições. No caso deste trabalho, o objetivo é reduzir o peso do teto, respeitando as normas vigentes e garantindo a segurança operacional do tanque.

Maximizar uma função objetivo é semelhante a minimizar uma função objetivo de mesmo módulo e sinal inverso [3]. Portanto, neste trabalho sempre que se referir à otimização de problemas, o termo minimização será utilizado genericamente.

Apesar de, através da otimização, nem sempre ser possível chegar à melhor solução absoluta, o próprio processo de busca pela solução ótima já é um avanço para um dado problema. A escolha do método a ser usado é essencial para que a solução encontrada esteja suficientemente próxima à solução ótima.

Em geral, o projeto de uma estrutura visa à redução de seu peso sem que limites de tensão e deformação sejam ultrapassados. Portanto, uma abordagem comum na modelagem de um problema de otimização estrutural é a de minimizar a função objetivo peso, sujeita a restrições de tensão e deformação. No entanto, esta maneira de se formular o problema pode dificultar o processo de otimização [4].

Há uma alternativa em que todos os objetivos formam uma única função objetivo. Neste caso, pode haver necessidade de uma análise de sensibilidade dos resultados, dependendo da formulação adotada.

Uma terceira maneira possível, é a de se considerar um problema com múltiplas funções objetivo. Como muitas vezes os objetivos adotados são conflitantes, é importante que o método de otimização, nesses casos, seja capaz de realizar satisfatoriamente o que é conhecido como *trade-off*, isto é, que encontre o equilíbrio entre duas características desejáveis, mas incompatíveis, chegando a uma solução melhor para o conjunto. Dependendo da necessidade ou até mesmo do nível de conhecimento do problema, pode se optar por estabelecer maior ou menor importância para cada função objetivo definida.

Como frequentemente não é possível encontrar uma solução que combine o ótimo de todos os objetivos, o que se tem é um conjunto com as melhores soluções possíveis. Neste contexto, surge o conceito da fronteira de Pareto (*Pareto front*).

Para compreender este conceito é necessário primeiro estabelecer o que se classifica por dominância. Uma solução “A” é dominante em relação a uma “B” se fornece resultados pelo menos iguais aos de “B” em todos os objetivos, mas é superior a “B” em pelo menos um deles. “A” pode ser simultaneamente dominante de “B” e dominada por uma solução “C”.

Há ainda a possibilidade que esta solução “C” supere a solução “D” em determinados objetivos, mas que, concomitantemente, seja superada pela mesma solução “D” em outros. Neste caso, nem “C” nem “D” exercem dominância uma sobre a outra. O conjunto de soluções que não são dominadas por nenhuma outra solução no conceito de dominância fazem parte do chamado *Pareto front*. A partir desse conjunto de “melhores soluções” é possível então selecionar uma solução para o problema.

Coello e Christiansen [4] tratam do problema de otimização estrutural com múltiplos objetivos, propondo um método baseado em algoritmos genéticos. Em seu estudo, aplicam o método em dois casos de projetos estruturais de treliças, obtendo bons resultados em comparação com aqueles decorrentes de outros métodos de otimização.

Em geral, a otimização estrutural pode ser aplicada a cálculos analíticos. Isso ocorre porque, para grande parte das estruturas desenvolvidas pelo homem, as formulações para tensão e deformação são bem conhecidas e as estimativas satisfatórias. Entretanto, pode haver casos em que o cálculo analítico não seja suficiente ou mesmo possível. Geometrias ou carregamentos mais complexos podem tornar a estimativa pouco precisa ou ainda pode haver a necessidade de avaliação mais detalhada das tensões em determinadas regiões.

Por isso, muitos autores optam por acoplar o algoritmo de otimização com a análise estrutural em elementos finitos a fim de reconhecer soluções viáveis. Este é o caso dos trabalhos de Demeulenaere *et al.* [5], sobre otimização de um turbocarregador, e de Kure *et al.* [6], a respeito da otimização estrutural de tetos de forma livre (*freeform*).

Neste último, a definição do problema é feita através de uma ferramenta de parametrização acoplada à ferramenta de otimização. A integração com análises estruturais possibilita a avaliação das tensões na estrutura para as formas geradas. A otimização do turbocarregador [5] envolve uma otimização acoplada tanto a análises mecânicas para obtenção do comportamento da estrutura como análises de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), para avaliação de performance do equipamento.

## 2.1 Métodos de Otimização

A quantidade de ferramentas de otimização disponíveis é quase tão grande quanto a variedade de aplicações possíveis. Como cada técnica tem vantagens e limitações próprias, a seleção do método deve considerar a natureza do problema a ser tratado. Alguns desses aspectos são [7]:

- Tipo de problema: linear ou não-linear, restrito ou irrestrito;
- Funções: diferenciáveis ou não-diferenciáveis, contínuas ou descontínuas;
- Variáveis: contínuas ou discretas;
- Número de variáveis: grande ou pequeno;
- Tipo de resposta desejada: otimização local ou global, projeto ótimo ou controle ótimo;

Além de analisar a aplicabilidade dos métodos de acordo com a natureza do problema, algumas características dos diferentes algoritmos devem ser consideradas. São três características principais, que auxiliam na eficiência do método: robustez, velocidade e precisão. Robustez é a propriedade que o algoritmo tem de encontrar o ótimo global, independente do ponto de partida. Velocidade é a taxa de convergência, ou seja, o número de iterações necessárias para chegar ao ótimo. E, por último, a precisão, que determina a capacidade do algoritmo de se aproximar do ponto ótimo. O algoritmo ideal seria rápido, robusto e preciso, mas é provado matematicamente que esse algoritmo não existe. É o que diz o teorema do “*no free lunch*”, isto é, é possível ter um algoritmo rápido e preciso, mas não será robusto, mostrando que é necessária uma diversidade de algoritmos, que devem ter suas características priorizadas de acordo com a necessidade.

As técnicas de otimização utilizadas para abranger essa variedade de problemas existentes podem ter diversas classificações, sendo uma delas entre as técnicas determinísticas, as estocásticas e as híbridas.

No primeiro caso, o problema é representado através de funções matemáticas e uma sequência determinística de possíveis soluções é gerada. Normalmente, métodos determinísticos definem a direção de busca a partir da derivação da função objetivo.

Já os métodos de otimização com algoritmos aleatórios, incluem escolhas probabilísticas no processo, o que pode levar a resultados diferentes em duas aplicações consecutivas, apesar da utilização do mesmo conjunto de dados iniciais. Normalmente, a heurística está presente nestes métodos, isto é, o problema é descrito de uma forma alternativa a fim de facilitar a otimização.

Alguns algoritmos combinam as duas técnicas a fim de obter as vantagens de ambos tipos, sendo então chamados de híbridos.

### 2.1.1 Métodos Determinísticos

Métodos determinísticos são caracterizados por processos cujos passos são previsíveis. Partindo de um mesmo ponto inicial, sempre se chega ao mesmo resultado.

Genericamente, esses métodos, também chamados “clássicos”, partem de um ponto no espaço de busca e a cada iteração, o ponto é atualizado no sentido do mínimo da função objetivo. A variação entre os métodos está na definição da direção da busca e na escolha do passo de cálculo – que é o quanto se caminha, por iteração, na direção definida. A grande maioria dos métodos desse tipo utiliza o gradiente da função objetivo para determinar a direção de busca.

A maior desvantagem desses métodos é que, em geral, garantem uma solução ótima para uma vizinhança da função. Isto é, quando a função objetivo possui mínimos/máximos locais, o método pode convergir para o ponto de mínimo mais próximo à região inicial de busca, ou seja, o resultado fica fortemente dependente do ponto de partida.

Além disso, supõem funções objetivo contínuas e diferenciáveis no espaço da busca. Para funções complexas, a diferenciação pode não ser possível ou ser extremamente difícil. Portanto, na escolha de métodos de gradiente, o custo computacional da diferenciação da função deve ser considerado, pois o cálculo da derivada será necessário em cada iteração.

É possível a aplicação de métodos de gradientes para variáveis discretas, porém, após a busca em um espaço contínuo, se faz necessária uma etapa para selecionar as variáveis discretas mais próximas às encontradas no espaço contínuo. Esta inserção de nova etapa também retarda o método.

Caso o problema tratado se adeque às limitações apresentadas, métodos determinísticos são uma boa alternativa para otimização, principalmente pela sua alta velocidade de convergência.

Um método clássico de otimização por gradiente para minimizar funções de várias variáveis é o *Steepest Descent* (Máxima Descida ou método de Cauchy). Este método consiste em utilizar como direção de busca o sentido do gradiente da função naquele ponto. O tamanho do passo aplicado nesta iteração é o ótimo para a direção selecionada.

O método de Cauchy geralmente é usado como base para elaboração de métodos mais sofisticados, o que o torna um bom parâmetro de comparação [8]. Sua importância também se encontra em sua utilização no estabelecimento do ponto inicial de busca para métodos mais sofisticados. Isso ocorre por ter boa convergência no início, mas se tornar lento quando próximo do ponto mínimo [9].

Alguns métodos determinísticos são citados na literatura como tendo boa aplicação para problemas de otimização estrutural, como o *Sequential Linear Programming* (SLP), *Sequential Quadratic Programming* (SQP) e o *Feasible Direction Method* (FDM).

Este último é usado por Chen [10] na otimização de treliças. O estudo modifica e integra o FDM com um programa de elementos finitos, para melhorar eficiência e convergência do método. São mostrados exemplos em que o método modificado converge a resultados que o método original não foi capaz de conseguir para mesmos exemplos.

Takada [11] utiliza *Linear Programming* e *Sequential Linear Programming* para otimização com múltiplos objetivos de estruturas de treliças.

Para problemas de programação não-linear, o método GRG, ou método do Gradiente Reduzido Generalizado, é um algoritmo muito eficiente [12]. Para sua utilização, a função objetivo pode ter qualquer forma de não linearidade, contanto que seja derivável. Neste método, as restrições de desigualdade são transformadas em restrições de igualdade através de variáveis de folga. Dessa forma, esse método ganha flexibilidade de aplicação.

No trabalho de [13] a eficácia do GRG é comparada com a de outro método, o *Downhill Simplex*, encontrando desempenho inferior para o GRG. Alguns autores também apontaram deficiências no método [14] e [15]. O GRG não-linear pode apresentar inconsistências na solução de acordo com o ponto inicial selecionado. Apesar dos problemas apontados, o método tem grande utilização, principalmente pela facilidade de utilização e pela velocidade de convergência.

Na literatura, são encontrados exemplos em que métodos determinísticos se aplicam a problemas de otimização estrutural de forma satisfatória. Entretanto, métodos baseados em gradiente podem chegar a soluções ótimas locais, por isso métodos heurísticos de otimização têm grande aceitação na solução de problemas complexos. No entanto, os métodos heurísticos costumam ter tempo de processamento maior.

## 2.1.2 Métodos Heurísticos

Muitas vezes em engenharia, há problemas complexos, de difícil representação e cujas funções nem sempre são diferenciáveis. Métodos heurísticos usam uma abordagem diferente do problema a fim de simplificar sua resolução. Por não utilizarem derivadas da função são classificados como métodos de ordem zero ou como métodos de “busca cega”.

Os métodos heurísticos costumam ter, em suas iterações, decisões de caráter probabilístico. Por esse motivo, não necessariamente encontram a solução ótima para o problema e, sim, buscam melhorar a solução inicial [16].

Esta técnica tem boa aplicação para problemas complexos de otimização, em que haja diversos parâmetros ou restrições e com grandes espaços de busca, evitando a seleção de resultados mínimos locais. Também podem trabalhar com descontinuidades, tanto na função objetivo quanto nos parâmetros. Sua maior desvantagem é o tempo de processamento.

Muitos métodos heurísticos se baseiam nos padrões encontrados na natureza para seu desenvolvimento. Desses, pode-se mencionar alguns com boa aplicação em problemas estruturais: *Particle Swarm Optimization*, *Simulated Annealing*, *Genetic Algorithms* e *Differential Evolution*.

### Particle Swarm Optimization (PSO)

O método do enxame de partículas (ou PSO na sigla em inglês) é um dos muitos métodos inspirados na natureza. Ele visa à representação do movimento de cada indivíduo de uma determinada espécie dentro do grupo; bando de pássaros ou cardumes de peixes, por exemplo.

O processo de otimização inicia-se com a criação de uma população inicial aleatória de soluções possíveis para o problema. Essas soluções, costumeiramente chamadas partículas, se movimentam pelo espaço de busca em função de sua experiência pessoal e da do grupo. O movimento das partículas baseia-se em sua posição e sua velocidade, que são influenciadas pelas informações da melhor posição individual e da melhor posição global encontradas até a iteração presente. A tendência é todas as partículas se concentrarem no ponto ótimo do espaço de busca.

### Simulated Annealing (SA)

O arrefecimento simulado, como é chamado em português, é um método que foi criado a partir de uma analogia com o processo de tratamento térmico utilizado na metalurgia chamado recozimento (*annealing*).

Este consiste em aquecer o metal até uma dada temperatura para então resfriá-lo de maneira controlada, de forma a permitir que os átomos se organizem numa estrutura de energia mínima.

O processo de otimização análogo parte de uma solução inicial viável, que pode ser substituída por soluções vizinhas de acordo com a função objetivo e uma variável chamada de temperatura, como referência ao processo original. Caso o custo da solução vizinha seja menor, a inicial é substituída. Caso contrário, a troca é decidida por probabilidade, em função da variável temperatura. A cada iteração a temperatura é reduzida em função de um fator de resfriamento determinado inicialmente. Dessa forma, conforme a temperatura diminui, a probabilidade de uma solução ruim ser aceita é menor.

A escolha do valor da taxa de resfriamento é crucial para a eficiência do método. Um resfriamento muito rápido limita o processo a uma busca local enquanto um resfriamento excessivamente lento pode levar o algoritmo a gastar muito tempo em soluções ruins.

O método tem grande vantagem por utilizar operações computacionais simples, tendo boa aplicação em problemas de diversos níveis de complexidade [16]. Outro ponto vantajoso do método é que é capaz de evitar mínimos locais sem depender de aproximação inicial da solução [8]. Suas desvantagens para a utilização em funções não-lineares encontram-se na falta de refino da busca em regiões promissoras e o alto custo computacional [8].

A fim de ganhar eficiência na utilização do SA, o trabalho de Nery [17] testa métodos híbridos em um caso genérico de otimização, com uma função objetivo bidimensional, não-linear, com diversos mínimos e máximos locais e duas restrições. O objetivo é comparar a qualidade da solução e o número necessário de avaliações para cinco alternativas de método. A primeira delas utiliza o método de *Simulated Annealing*. As quatro seguintes combinam de duas formas o SA com dois métodos determinísticos (Gradientes Conjugados e Máxima Descida). Os resultados mostram que a inclusão de métodos de gradiente no processo auxilia a convergência do método, mostrando bom potencial para problemas complexos de otimização.

### Genetic Algorithms (GA)

O método dos algoritmos genéticos é baseado na teoria evolutiva de Darwin. O processo de otimização é probabilístico e se baseia no princípio de sobrevivência do mais apto e na reprodução. Os indivíduos mais bem adaptados têm maior chance de se reproduzir, de forma que, a cada nova geração, há uma população teoricamente mais bem



adaptada. O método também permite a inserção de mutações nas características dos indivíduos gerados, também conforme o processo de evolução darwiniano.

Em termos práticos, cria-se uma população inicial com possíveis soluções aleatórias para o problema a ser tratado. Essa população será inicialmente avaliada na sua capacidade de resposta ao problema existente. A avaliação relaciona cada indivíduo gerado da população a uma probabilidade de reprodução.

O processo de cruzamento dos indivíduos se dá de forma aleatória, tendo em vista as probabilidades adotadas. Os indivíduos mais capazes têm maior chance de passarem suas características para a próxima geração (iteração).

Eventualmente, pode-se estabelecer uma frequência de ocorrência de mutações, isto é, alterações nas características dos indivíduos gerados, a fim de acrescentar variedade à população.

Por fim, atualiza-se a população com os novos indivíduos gerados. Esse processo se repete até que o critério de parada seja atingido.

A definição do tamanho da população, do número de iterações e da aplicação de *crossover* e mutações, assim como a codificação dos indivíduos em “cromossomos”, tem grande impacto no sucesso e na eficiência do processo. Deve-se observar as particularidades da técnica que melhor se aplicam ao caso em estudo, a fim de atingir bons resultados sem esforço computacional excessivo.

O método de algoritmos genéticos é largamente utilizado na busca por soluções estruturais, apresentando com bons resultados. Há diversos exemplos de sua aplicação, sendo a maioria delas aplicada a treliças.

Em Mobasher *et al.* [18], algoritmos genéticos são utilizados para otimizar o custo da estrutura de treliça de tetos residenciais feitos em aço. O método conseguiu uma redução significativa da quantidade de elementos da treliça e, através de um teste em escala real, foi possível verificar que a estrutura otimizada é de fato resistente.

Togan e Daloglu [19] também otimizam estruturas de treliças através do método de algoritmos genéticos, incluindo adaptações no sistema de penalidades e nos de mutações e de *crossover* do método original. A intenção é a de evitar que o método se detenha em mínimos locais. Além disso, é proposto um método de agrupamento de indivíduos, a fim de aumentar a convergência do método.

Outros trabalhos, como os de Chen e Rajan [20] [21] [22], também apresentaram foco no desenvolvimento de métodos para melhoras em eficiência, confiabilidade e acurácia da otimização estrutural por meio de algoritmos genéticos,

### Differential Evolution (DE)

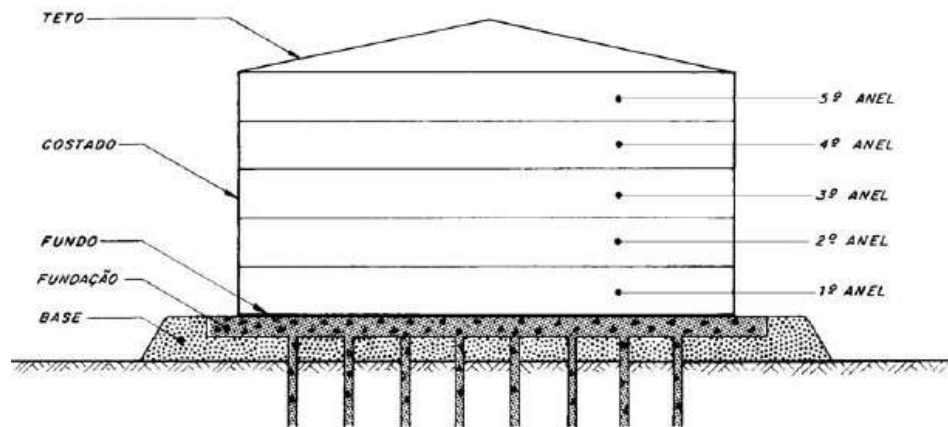
Esta técnica tem boa aplicação para problemas complexos de otimização, em que haja diversos parâmetros ou restrições e com grandes espaços de busca. Seu caráter aleatório contribui para evitar que o processo se prenda a mínimos locais. É baseada no método dos Algoritmos Genéticos, o que significa que, na Evolução Diferencial (DE), uma população inicial gerada aleatoriamente também deve sofrer processos de evolução, gerando populações mais bem adaptadas. O DE foi, inicialmente, desenvolvido para espaços de busca contínuos [23]. A diferença para o AG está na forma como a aplicação de mutações, *crossover* e cruzamento dos indivíduos é realizada.

Muitos estudos são feitos no sentido de ajustar critérios de convergência, mecanismos de *crossover*, funções de penalidade, etc., para cada caso de otimização. A eficiência do método depende fortemente da definição desses parâmetros.

Ho-Huu *et al.* [24] estudam a otimização de treliças utilizando o método chamado de “*adaptive elitist differential evolution*” (aeDE). O método é aplicado para o caso de existência de variáveis discretas, pois as áreas seccionais das vigas da treliça costumam ter valores discretos. O aeDE é uma adaptação do método de “*differential evolution*” (DE), com três modificações básicas, uma no algoritmo de mutações, uma na seleção de indivíduos para gerar a próxima geração e a terceira para tratar as variáveis discretas. Essas alterações visam a diminuir o custo computacional do método base DE. O estudo mostrou, através de seis casos de otimização de treliças, que, em muitos dos casos analisados, o método adaptado proposto possui melhor eficiência do que o método DE e outros métodos de otimização como o de algoritmos genéticos ou o HPSO (*Heuristic Particle Swarm Optimization*).

### 3 Tanques de Armazenamento

Em uma planta de processos, a estocagem de diversos produtos envolvidos na produção é feita através de tanques de armazenamento. Esses equipamentos são responsáveis por armazenar grandes inventários de produtos como petróleo e seus derivados, resíduos, misturas etc., a pressões próximas à atmosférica. São, portanto, logisticamente essenciais no processamento de petróleo. Além de sua importância logística, apresentam alto custo de construção e manutenção além de altos riscos associados à operação, o que reforça a necessidade de um amplo planejamento durante todas as etapas de sua vida útil, do projeto à desativação. A Figura 3-1 apresenta os principais componentes de um tanque de armazenamento.



**Figura 3-1 – Visão Geral de um Tanque de Armazenamento**

O projeto e a construção de tanques de armazenamento estão regulamentados pela API 650 [25]. No Brasil, a norma NBR 7821 [26] complementa os requisitos internacionais.

A Figura 3-2 apresenta um exemplo de parque de armazenamento, local destinado à armazenagem e transferência de produtos, onde são instalados os tanques de armazenamento. A disposição dos tanques em um parque de armazenamento leva em

consideração o tipo de produto armazenado, o volume do tanque e outras instalações ao redor do parque de armazenamento, como rodovias, edifícios etc.



**Figura 3-2 – Parque de Armazenamento (Fonte: [27])**

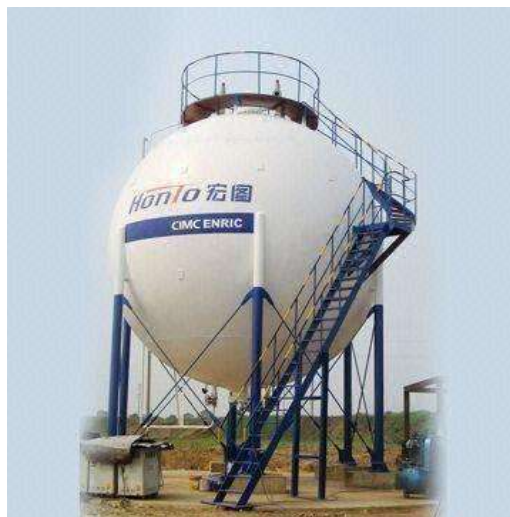
Em geral, os tanques de armazenamento são construídos em aço carbono, mas podem ser encontrados tanques de alumínio, aço inoxidável, concreto ou de algum polímero especial. Os tanques feitos de materiais plásticos possuem a vantagem de não serem corrosivos, serem leves e de baixo custo. No entanto, têm limite em relação à temperatura de operação, pois quando expostos a altas temperaturas têm menor durabilidade em relação aos tanques de metal. Os tanques de metal são considerados equipamentos de caldeiraria pesada, por necessitarem de grande quantidade de material em sua fabricação.

Os tanques de armazenamento podem apresentar modos de falha variados e complexos e sua falha pode ocasionar grandes impactos ambientais e descontinuidade operacional. Por isso, a inspeção e a manutenção são atividades de extrema importância para verificar a existência de imperfeições, como trincas, e para tomar as medidas necessárias para evitar possíveis vazamentos. A manutenção de tanques de armazenamento de petróleo exige grande esforço, além de mobilizar uma parte significativa da capacidade instalada em decorrência da demanda temporal envolvida. Há casos em que é necessário um período de cerca de um ano para que a manutenção

do tanque seja completa. Por esse motivo, são feitas inspeções externas rotineiramente e utilizam-se intervalos maiores para as inspeções gerais do tanque de armazenamento.

De acordo com sua função na unidade de processo, os tanques de armazenamento possuem as mais diversas formas, tamanhos e tipos. Existem tanto tanques com diâmetros de 2 ou 3 metros como tanques com diâmetros que ultrapassam os 80 metros, o que significa que a capacidade de um único tanque pode ultrapassar 1 milhão de barris. O fundo de um tanque de armazenamento pode ser plano, curvo, esférico, cônico, cônico invertido ou inclinado. O costado pode ser cilíndrico ou esférico e o teto pode ser fixo, flutuante, móvel ou com diafragma flexível. Os tanques também podem ser ou não enterrados, entre outras características.

Neste trabalho, o foco são tanques cilíndricos verticais construídos em aço (Figura 3-5), que são os equipamentos tipicamente encontrados em refinarias, terminais, bases de distribuição etc. As figuras a seguir (Figura 3-3 a Figura 3-5) apresentam alguns exemplos dos diversos tanques de armazenamento existentes na indústria.



**Figura 3-3 – Tanque Esférico (Fonte: [28])**



**Figura 3-4 – Tanque de Fundo Cônico (Fonte: [29])**



**Figura 3-5 – Tanque Cilíndrico Vertical (Fonte: [30])**

A seleção do tanque de armazenamento de uma unidade operacional é função de diversos fatores referentes à região onde o parque de armazenamento será instalado e ao tipo de produto armazenado. Por exemplo, o tipo de solo é fator determinante na definição da fundação do tanque de armazenamento enquanto características como volatilidade, inflamabilidade, temperatura e pressão de armazenamento do produto a ser estocado influenciam na forma e no tamanho do tanque. O espaço disponível para instalação do tanque assim como as condições ambientais, a segurança operacional, o custo do equipamento e as perdas operacionais também são fatores determinantes para a seleção. A norma N-270 [31] contém recomendações do tipo de tanque a ser utilizado em função do produto armazenado.

A definição do volume do tanque deve atentar também para outros aspectos operacionais. Quanto maior a capacidade de armazenamento do tanque, menores são as perdas por evaporação, o custo do barril armazenado e os custos de manutenção e inspeção. Por outro lado, uma maior quantidade de tanques garante maior segurança da continuidade operacional e alguns requisitos logísticos, como a quantidade de segregação necessária e o espaço disponível no parque de armazenamento, podem limitar as dimensões dos tanques [32]. Outro fator que influencia no tamanho do tanque de armazenamento é a resistência requerida para o costado, que pode exigir materiais de alta resistência mecânica ou de elevada tenacidade.

Como no geral os custos reduzem com o aumento da capacidade individual de cada tanque, os tanques de armazenamento têm historicamente crescido em volume. A classificação dos tanques quanto à sua capacidade útil está apresentada na Tabela 3-1.

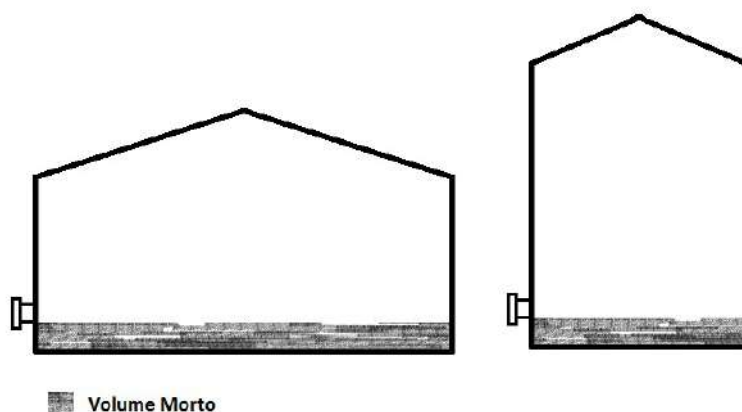
**Tabela 3-1 – Classificação de Tanques de Armazenamento quanto à Capacidade**

Classificação	Capacidade
Pequeno	16 a 8.000 m <sup>3</sup> (≈ 100 a 50.000 bbl)
Médio	8.000 a 87.500 m <sup>3</sup> (≈ 50.000 a 550.000 bbl)
Grande	Acima de 87.500 m <sup>3</sup> (≈ 550.000 bbl)

Fonte: [33]

A relação entre o diâmetro e a altura do tanque de armazenamento influencia em seu custo. Não há na literatura um método analítico para determinar a melhor relação para um projeto mais econômico. Entretanto, empiricamente, o diâmetro e a altura são aproximadamente de igual dimensão para tanques de pequena e média capacidade, enquanto a relação de diâmetro sobre altura é de 8/3 para tanques de grande porte.

Algumas considerações são importantes na definição das dimensões dos tanques de armazenamento. É interessante que sejam escolhidas dimensões tais que não seja necessário realizar o corte das chapas, minimizando assim as operações de corte e soldagem. Grandes diâmetros de tanque permitem maior distribuição da carga sobre a fundação, mas exige uma maior área de ocupação para que haja afastamento entre os tanques. Além disso, tanques com maiores diâmetros apresentam menor volume útil, quando comparados a tanques com menor diâmetro, pois o volume não movimentável é maior (Figura 3-6).



**Figura 3-6 – Volume Morto para Diferentes Diâmetros**

Os tanques de armazenamento podem ser classificados de acordo com diversos outros critérios como pressão de operação, nível do terreno ou a classe do produto armazenado.

A classificação do produto armazenado é de acordo com seu ponto de fulgor. Produtos da classe I possuem ponto de fulgor inferior a 37,8 °C; os de classe II possuem ponto de fulgor entre 37,8 e 60 °C; e os de classe III têm ponto de fulgor superior a 60 °C. De acordo com a classe do produto armazenado, os tanques de armazenamento devem obedecer a diferentes requisitos para garantir a segurança do produto estocado.

Em relação à sua elevação em relação ao nível do terreno, os tanques de armazenamento podem ser desde completamente enterrados até elevados em relação ao solo. Os tanques elevados são sustentados por uma estrutura que os mantém acima do solo. Os tanques de superfície são aqueles cuja base está diretamente apoiada sobre o solo e são os mais comuns na indústria. Há também tanques semienterrados e subterrâneos, que estão total ou parcialmente abaixo da superfície do terreno.

Tanques de armazenamento operam a baixas pressões: equipamentos de estocagem de pressões mais elevadas são classificados como reservatórios ou vasos de pressão. Portanto, a classificação de tanques de armazenamento quanto à pressão de operação é dividida apenas entre tanques de baixa pressão e tanques atmosféricos.

Os tanques de baixa pressão operam com pressões levemente acima da atmosférica (entre 0,05 e 1,05 kgf/cm<sup>2</sup>.g) e podem ser interpretados como vasos de pressão para fins de projeto, contanto que sejam ajustadas algumas considerações. São usados para o armazenamento de fluidos mais voláteis, isto é, com pressão de vapor mais alta. Os dois tipos mais comuns de tanques de armazenamento de baixa pressão são o semi-esferoidal e o esferoidal.

Os tanques atmosféricos são projetados para operar com pressões internas próximas à atmosférica e são utilizados para produtos com menor volatilidade. A melhor forma de classificar os tanques de armazenamento atmosféricos é quanto ao tipo de teto que possuem. Os dois tipos mais comuns são os tanques com tetos fixos e os com teto flutuante, apesar de existirem tetos móveis e tetos com diafragma flexível. Esses dois últimos são pouco utilizados por apresentarem restrições práticas. Por esse motivo, maior atenção foi dada aos tetos fixos e flutuantes.

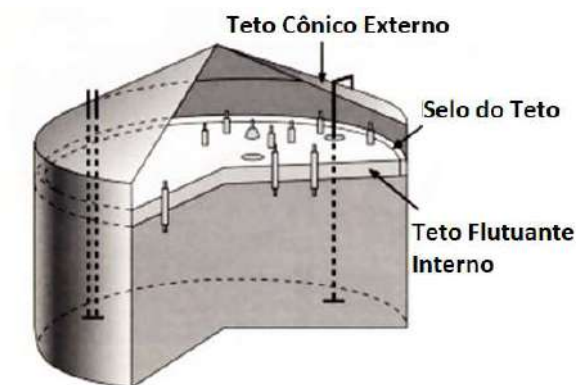
Os tetos fixos são estruturas rígidas ligadas diretamente à parte superior do costado do tanque. Seu formato pode ser cônico, curvo ou em gomos (*umbrella*).



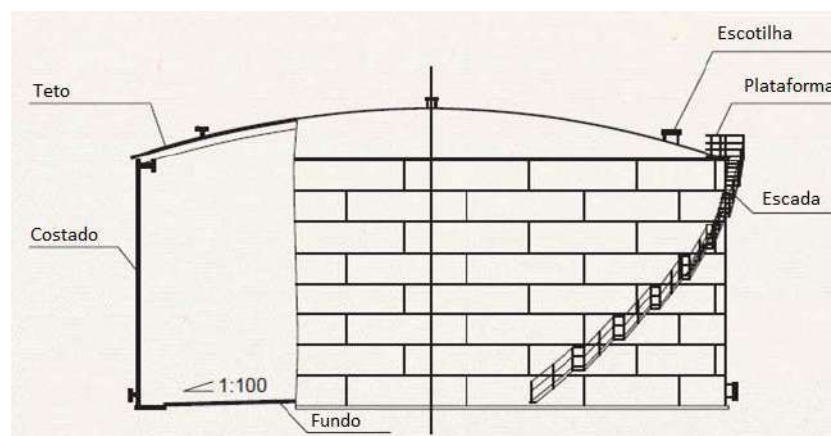
O tipo mais simples e mais comum em refinarias de petróleo é o cônico, que tem a forma de um cone reto. Suas dimensões podem chegar a 75 metros de diâmetro e 18 metros de altura, dependendo do projeto. A estrutura de sustentação do teto fixo varia muito em função do seu tamanho. Tetos de tanques de pequeno diâmetro são autoportantes (sem estruturas de sustentação), enquanto tetos maiores possuem uma estrutura interna de perfis metálicos para sua sustentação (tetos suportados, como são chamados).

Os tetos curvos têm a forma de calotas esféricas e normalmente são autoportantes. Os tetos em gomos são uma modificação dos tetos curvos, formato pela união de diversas chapas curvas de maneira que um corte horizontal do teto seja na forma um polígono regular. Esses tetos em *umbrella* são mais comumente empregados em tanques de pequeno porte.

Na Figura 3-7, há um desenho esquemático de um tanque de armazenamento de teto fixo cônico, com um teto flutuante interno. Na Figura 3-8, está apresentado o desenho esquemático de um tanque com teto curvo.



**Figura 3-7 – Tanque com Teto Cônico (Fonte: [34])**



**Figura 3-8 – Tanque com Teto Curvo (Fonte: [34])**

Os tetos fixos apresentam elevadas perdas por evaporação. Por esse motivo, são utilizados para os derivados mais pesados de petróleo (asfalto, parafina, óleo combustível, diesel, etc.) e para produtos químicos como a soda cáustica e a amônia.

As altas perdas por evaporação se devem ao espaço vapor<sup>1</sup> deixado pela configuração dos tetos fixos. O vapor acumulado nesse espaço entre o fluido e o teto também aumenta os riscos operacionais e ambientais do tanque. Existem quatro condições cruciais para a ocorrência de evaporação [33]:

1. Temperatura elevada da superfície livre;
2. Grande espaço vapor;
3. Renovação constante dos gases do espaço vapor; e
4. Grande área de superfície líquida.

O aumento de temperatura da superfície ocorre principalmente pela troca de calor com o ambiente, devido à energia solar. Neste ponto, os tetos fixos transferem menos calor para o líquido pela existência de maior espaço vapor. A condutividade térmica de chapas de aço é alta, portanto, a existência de uma camada de ar entre o teto e o líquido retarda o aquecimento do produto armazenado. O segundo e o terceiro fatores são drasticamente reduzidos com a utilização de tetos flutuantes, já que esses tetos são sustentados pelo próprio fluido armazenado. A área de superfície líquida é dependente apenas do tamanho do tanque de armazenamento.

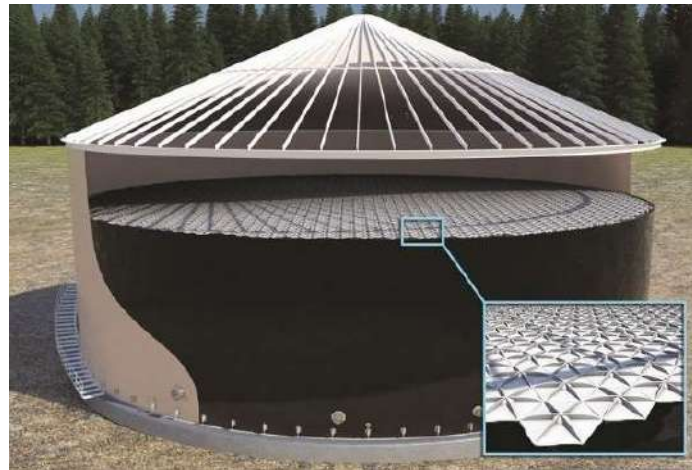
A maior vantagem dos tetos flutuantes está no fato de flutuarem no produto armazenado, o que deixa o mínimo de espaço entre o teto e o fluido, reduzindo significativamente a perda por evaporação. Segundo Alves [33], cerca de 3% de todo o conteúdo do tanque é perdido por esta causa e este número pode ser reduzido em mais de 90% com a utilização de tetos flutuantes. Essa redução representa uma melhora econômica, ambiental e de segurança, pois a supressão do espaço vapor confere ao tanque redução nas perdas de produto, no risco de explosão, na poluição ambiental e no custo de armazenamento. Os tetos flutuantes são mais utilizados para produtos de frações mais leves como petróleo, naftas e gasolina.

Um bom exemplo prático da importância da redução do espaço vapor é que alguns tanques de teto fixo possuem internamente um segundo teto, flutuante. Entretanto, os tetos flutuantes também podem funcionar como único teto da estrutura, ou seja, podem ser externos.

---

<sup>1</sup> Espaço vapor é definido como o espaço entre a superfície do líquido armazenado e a cobertura do tanque de armazenamento.

Para os tetos externos, a regra da Associação Brasileira de Normas Técnicas para tanques de armazenamento, a NBR 7821 [26], reconhece duas configurações estruturais básicas: tetos duplos e tetos pontão. Para tetos internos, não há exigência de um desses dois tipos, podendo o teto ser apenas um lençol simples de chapas reforçadas. O teto flutuante simples é o de menor custo, porém apresenta baixa flutuabilidade. A Figura 3-9 apresenta um tanque com teto externo cônico e teto flutuante interno.



**Figura 3-9 – Teto Flutuante Interno (Fonte: [35])**

O teto duplo é constituído por dois lençóis de chapas conectados por uma estrutura interna (Figura 3-10), conferindo-o boa flutuabilidade e maior isolamento térmico para o líquido armazenado, por causa da camada de ar no interior do teto. O isolamento térmico reduz as perdas por evaporação, sendo o teto flutuante com maior vantagem nesse aspecto. As desvantagens desse tipo de teto estão no alto custo e na rigidez da estrutura, que limita operacionalmente o tanque. O alto custo inviabiliza sua utilização para tanques de grande porte.



**Figura 3-10 – Tanque com Teto Flutuante do Tipo Duplo (Fonte: [36])**

O teto pontão constitui-se em um chapeamento simples central, que pode ser reforçado ou não, e um flutuador em forma de anel, ao longo do perímetro (Figura 3-11). Têm custo intermediário entre o teto simples e o duplo. A maior desvantagem deste tipo de teto flutuante é a dificuldade na drenagem de águas pluviais, para o caso de teto flutuante externo. Também estão sujeitos a colapso pela excessiva pressão de vapor que pode ocorrer, o chamado bolsão de gás.



**Figura 3-11 – Tanque com Teto Flutuante do Tipo Pontão (Fonte: [36])**

Uma variação construtiva, mas não muito comum, dos tetos pontão é o teto tipo *Buoyroof*. Esse teto é composto por flutuadores que se dispõem ao longo de toda a superfície do teto.

Em relação aos tetos fixos, os tetos flutuantes apresentam menor custo para aplicações em tanques de média ou grande capacidade (acima de 10.000 m<sup>3</sup>). Por suas vantagens operacionais, os tetos flutuantes têm sido cada vez mais utilizados, acompanhando a tendência atual de construção de tanques de grande capacidade em terminais e refinarias. A limitação de uso de tetos flutuantes é para produtos com pressão de vapor acima de 0,75 kgf/cm<sup>2</sup> e/ou com densidade relativa abaixo de 0,7, por riscos de adernamento do teto.

Os requisitos mínimos de projeto para tetos flutuantes externos estão no apêndice C da API 650 [25]. Na norma da Petrobras N-270 [31], há uma recomendação para a configuração estrutural dos tetos flutuantes, definida em função do diâmetro do tanque de armazenamento ( $D_{tanque}$ ). Na Tabela 3-2, essas recomendações estão apresentadas. Define-se “Pontão Convencional” como o teto com flutuadores periféricos e lençol

central não reforçado enquanto que “Pontão Reforçado” se refere aos tetos cujo disco central apresenta reforçadores.

**Tabela 3-2 – Seleção de Tipo de Teto Flutuante Externo**

Diâmetro (m)	Tipo de Teto Flutuante Externo
$D_{\text{tanque}} \leq 20$	Duplo
$20 < D_{\text{tanque}} \leq 35$	Pontão Convencional
$D_{\text{tanque}} > 35$	Pontão Reforçado

Portanto, a construção de tanques de grande capacidade cria a tendência de utilização de tetos do tipo *pontoon*, caso se opte por tetos flutuantes. Os tetos flutuantes do tipo *pontoon* estão melhor descritos no capítulo 4, onde há detalhes do projeto e da operação desse tipo de teto.

Nesses tetos, é necessária a existência de dispositivos de controle de pressão, para evitar que ela se eleve demasiadamente, garantindo a segurança da operação. Esse dispositivo também garante que não se acumule vapor entre a superfície do líquido armazenado e o lençol central.

O teto fixo com diafragma flexível também é uma alternativa para a redução do espaço vapor. Internamente ao teto fixo, é instalada uma membrana flexível, normalmente de material plástico, que modifica o espaço vapor conforme a variação da pressão no interior do tanque.

Há também a possibilidade de tanques de armazenamento de topo aberto. Esses tanques têm uso limitado, sendo normalmente utilizados para armazenamento de água bruta.

### 3.1 Acessórios de Tanques de Armazenamento

Independentemente de sua concepção, os tanques de armazenamento apresentam alguns acessórios, equipamentos e sistemas auxiliares, que garantem sua funcionalidade durante a operação. As aberturas existentes na estrutura visam a comunicação com o meio externo, seja por tubulações ou por portas de limpeza e bocas de visita, para passagem de pessoal e equipamentos. Alguns dos principais sistemas encontrados nos tanques de armazenamento estão descritos a seguir.

Na região do fundo do equipamento, há o sistema de drenagem de fundo do tanque. Eram permitidos dois tipos de dreno para esse sistema, o dreno sifão e o dreno por

baixo. No entanto, o dreno por baixo apresentava alto risco de entupimento no caso de armazenamento de produtos com sedimentos, era de difícil inspeção e ainda tinha maiores riscos de aparecimento de trincas em tanques aquecidos. Por esses motivos, o dreno sifão é o mais utilizado atualmente.

Na região do costado dos tanques de armazenamento, há bocais com diversas finalidades. A distância mínima entre os centros deve respeitar o valor de uma vez e meia a média dos diâmetros. Algumas das funções dos bocais de costado são:

- Movimentação de produto;
- Sistema de drenagem (dreno de fundo e dreno de teto flutuante);
- Sistema de aquecimento;
- Sistema de combate a incêndio (câmara de espuma);
- Misturadores;
- Limpeza com vapor.

As bocas de visita do costado devem ser orientadas na direção dos ventos predominantes e serem dispostas igualmente espaçadas ao longo da circunferência. Para os tanques de teto flutuante, é importante que as bocas de visita sejam baixas para não afetarem a movimentação do teto.

Na Figura 3-12, observam-se as bocas de visita em um teto *pontoon*, com duas bocas de visita por compartimento do pontão. Na Figura 3-13, há detalhes da boca de visita do teto pontão.



**Figura 3-12 – Bocas de Visita em Teto Flutuante (Vista Geral)**



**Figura 3-13 – Bocas de Visita em Teto Flutuante (Detalhes)**

O sistema de enchimento dos tanques de armazenamento é um conjunto de tubulações que devem ser curtas, sem curvas e livre de obstruções. No caso de tubulações com comprimento superior a 30 metros, devem ser instaladas válvulas de drenagem na seção mais baixa da tubulação e na conexão da linha de enchimento. Devem-se dispor as entradas e saídas do tanque de forma a evitar a entrada de ar e a formação de eletricidade estática. Em tanques horizontais, o enchimento deve ser feito pela parte superior do tanque. Nos tanques verticais, é permitido que o enchimento seja feito pela parte de baixo do tanque, reduzindo o trabalho do conjunto motor-bomba.

O produto armazenado precisa manter sua homogeneidade, seja quanto à temperatura quando o fluido é aquecido, seja quanto à composição quando há misturas. Para garantir a homogeneização do fluido e evitar a sedimentação de impurezas, os tanques de armazenamento possuem agitadores.

Para produtos de baixa viscosidade (gasolina, querosene, diesel), os agitadores costumam ser pás acopladas a um eixo acionado por motor elétrico. Para produtos como o óleo combustível e o asfalto, a homogeneização é realizada através do Jet-Mix, que provoca a circulação por pressão no interior do tanque. É feita a sucção do produto por uma bomba específica para isso, tendo a tubulação de descarga no próprio tanque, direcionada para o alto. O estudo do sistema externo de movimentação de fluido considera diversos estágios, dentre eles o estudo da configuração do sistema, a



verificação do seu desempenho, a verificação da efetividade do estrangulamento do diâmetro e a avaliação do desempenho quanto à homogeneização.



**Figura 3-14 – Misturadores em Hélice (Vista Geral e Detalhe)**

Os tanques que armazenem líquidos combustíveis ou inflamáveis devem ser dotados de um sistema de combate a incêndio. Nos tanques de teto externo fixo, são instaladas no costado câmaras de espuma ou o tanque é mantido pressurizado com gás inerte. Os tanques de teto flutuante externo possuem aplicadores de espuma que lançam espuma na região da selagem do teto com o costado.

Alguns derivados de petróleo estão sujeitos ao aumento excessivo de viscosidade ou até mesmo à solidificação quando em temperatura ambiente. Para manter o produto em um estado desejável durante o armazenamento, os tanques possuem um sistema de aquecimento feito por serpentinas de vapor, feixes tubulares, “baionetas”, etc.

Para diminuir a perda de calor nos tanques de produtos aquecidos, os tanques de armazenamento podem apresentar isolamento térmico. No entanto, o alto custo de investimento e de manutenção nesse acessório implica na sua utilização apenas para tanques que operem em alta temperatura, como os de asfalto e de resíduos de vácuo.

Os tanques de aço também apresentam revestimentos interno e externo por meio de pintura ou de películas protetoras, que o protegem da corrosão devido ao contato com o ar e com os demais fluidos. Internamente, podem ser revestidos por materiais resistentes como o chumbo, o alumínio, borracha, fibra de vidro, entre outros, de acordo com as necessidades do projeto.

Durante a manutenção do tanque, é feita a limpeza do fundo do tanque para a retirada da borra que se acumula durante a operação. Para acesso ao tanque, são instaladas portas de limpeza na base dos tanques de armazenamento. As portas de limpeza também devem estar orientadas com os ventos predominantes do local de construção do tanque. Nos casos em que houver mais de uma porta de limpeza, duas delas devem



ser diametralmente opostas e orientadas com o vento. Caso só haja uma porta de visita, a circulação de ar deve ser garantida instalando-se uma boca de visita diametralmente oposta à porta de limpeza, também orientadas na direção dos ventos predominantes.

Dependendo de suas dimensões, a porta pode permitir a passagem de equipamentos para remoção da borra ou não. Nos casos em que a porta não possui dimensões suficientes, a remoção deve ser feita manualmente, o que retarda o processo e expõe os trabalhadores a mais riscos.

A pressão interna de projeto de um tanque de teto fixo é limitada ao peso das chapas do teto por unidade de área. Possuem, portanto, uma conexão do teto com a atmosfera, que pode ou não possuir uma válvula de pressão e vácuo. Esse acessório, chamado respiro, evita a formação de vácuo durante o esvaziamento do tanque ou de sobrepressão durante o enchimento do mesmo. As mudanças de pressão podem ocorrer também devido a mudanças de temperatura do produto pela ação do sol. O respiro é obrigatório em tanques de teto fixo, mas também pode ser utilizado em tetos flutuantes. É importante que o diâmetro da tubulação do respiro seja maior do que o da tubulação de enchimento e que a saída do respiro seja para um local onde seja possível a correta dispersão do vapor. A tubulação de respiro costuma ser protegida por uma tela de arame em sua saída, para evitar entradas indesejadas por essa tubulação.

Para o controle do nível no tanque, da temperatura, da pressão, etc., é necessário que os tanques possuam sistemas de medição. Nos tanques cilíndricos horizontais, a régua de medição graduada é um dos meios de medição mais seguros. Nos tanques verticais, normalmente é fornecido o indicador de nível. Existem outros sistemas de medição de nível como o de boia e peso e o de braços de boia e oscilação.

Como medida de segurança, os tanques de armazenamento são circundados por diques com capacidade para conter um possível vazamento, evitando que o produto ou um possível incêndio se alastrem por grandes áreas. Todos os tanques destinados a armazenar produtos inflamáveis, tóxicos ou químicos devem, por norma, ser dotados de diques. A bacia de contenção deve ter capacidade superior à do tanque de armazenamento por ter como finalidade conter o vazamento e restringir os riscos à propriedade e ao meio ambiente. Os diques podem ser construídos de diversos materiais como terra, concreto, alvenaria e chapas metálicas. Os diques de terra são os mais frequentes e sua superfície deve ser protegida contra erosão através do plantio de grama, por exemplo. Os diques de concreto são os mais caros, mas com custos desprezíveis de manutenção. Os diques são dotados de um sistema de drenagem, com

drenos de bacia e drenos pluviais, que devem ser mantidos limpos e desobstruídos para que não haja risco de transbordamento.

Para tanques de teto flutuante externo, é exigida a presença de um anel de contraventamento ao longo da circunferência do topo do costado, a fim de manter a circularidade da estrutura. Esse anel deve ter uma largura mínima de 600 mm para que sirva como passadiço. Anéis de contraventamento intermediários podem ser necessários em tanques que estejam sujeitos a cargas simultâneas de vento e vácuo e a verificação de sua necessidade é dada pela API 650 [25].

Os tanques de armazenamento possuem escadas, plataformas e passadiços para permitir a circulação de pessoas. As escadas de acesso ao topo do equipamento costumam ser helicoidais, conforme a escada que pode ser vista na Figura 3-5. Escadas do tipo marinheiro só são indicadas para tanques de até seis metros de altura.

Os tetos flutuantes possuem também uma escada de acesso ao teto (Figura 3-15). Como o teto não é fixo, essa escada precisa ser articulada no topo do costado e necessita de trilhos instalados no teto, para que possa continuar operacional para qualquer nível de enchimento do tanque (Figura 3-16). Esse mecanismo da escada exerce muito esforço no teto flutuante, sendo um acessório que merece atenção estrutural.



**Figura 3-15 – Escada do Teto Flutuante**



**Figura 3-16 – Trilhos da Escada do Teto Flutuante**

Outro acessório que é consequência de o teto flutuante se deslocar verticalmente, acompanhando o nível do produto no tanque, é o sistema de vedação. Esse sistema está localizado entre o teto e o costado do tanque, para cobrir a folga que permite a movimentação do tanque. O selo de vedação isola o produto do meio externo, evitando a perda e a contaminação do produto. Ele deve ser flexível para manter o teto estanque sem impedir a movimentação do teto em conjunto com o fluido armazenado. A Figura 3-17 mostra em detalhe o selo de vedação de um teto flutuante.



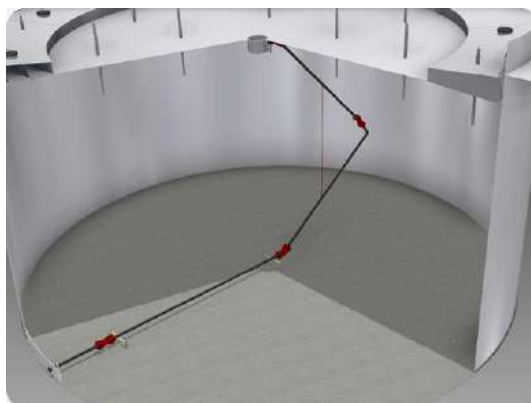
**Figura 3-17 – Selo de Vedação**

O teto flutuante é equipado por um dreno principal (Figura 3-18) que é ligado a uma tubulação que também deve ser flexível, para que não impeça a sua movimentação. As figuras a seguir apresentam dois exemplos de tubulação possíveis para a drenagem no

teto flutuante: com juntas flexíveis (Figura 3-19) ou com mangueiras flexíveis (Figura 3-20). O sistema de drenagem também possui um dreno de emergência, que drena diretamente para o interior do tanque, no caso de falha do dreno principal.



**Figura 3-18 – Dreno em Teto Flutuante**



**Figura 3-19 – Sistema de Drenagem com Juntas Flexíveis (Fonte: [37])**



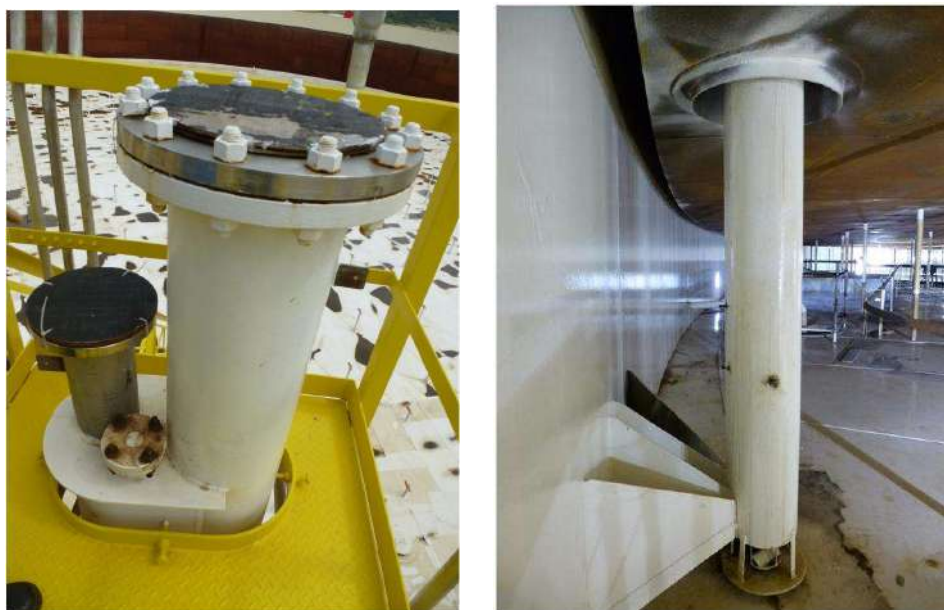
**Figura 3-20 – Sistema de Drenagem com Mangueira Flexível**

Os tetos flutuantes são dotados de pernas de sustentação que o suportam na ausência de produto armazenado, mas são utilizadas apenas durante atividades de inspeção ou de manutenção do tanque, quando todo o conteúdo do tanque deve ser retirado. As pernas de sustentação do teto podem ser vistas na Figura 3-21.



**Figura 3-21 – Pernas de Sustentação**

Outro acessório dos tetos flutuantes é a guia antirrotacional: estrutura responsável por mantê-lo centrado e evitar que ele gire em torno do eixo vertical (Figura 3-22). Essa estrutura vertical é às vezes aproveitada como instrumento de medição de nível e de coleta de amostras. Nesses casos, a guia deve possuir furos ao longo de seu comprimento para melhor representatividade da amostra.



**Figura 3-22 – Guia Antirrotacional de Medição e Amostragem**



## 4 Tetos Flutuantes

O objetivo de otimizar estruturalmente os tetos flutuantes do tipo pontão teve origem na análise dos dados de tetos existentes. Observou-se que as variações de peso do teto pontão não eram proporcionais às variações de diâmetro. Os dados reais não podem ser fornecidos por motivos de confidencialidade, mas seguem alguns exemplos das observações feitas.

Dois tetos flutuantes do tipo pontão, ambos com diâmetros de aproximadamente 85 metros, possuíam diferença de cerca de 30% no seu peso total. O número de anteparas radiais de um é mais do que o dobro do outro (2,6 vezes). Outro caso de comparação é o de dois tetos, um com o dobro do diâmetro do outro e o peso do maior apenas 6% acima do peso do menor.

O custo com material é significativo em estruturas de aço, portanto a redução de peso representa grande economia. Observada a falta de padronização no projeto de tetos pontão, optou-se por desenvolver uma metodologia de cálculo para prever suas dimensões ótimas. Para tanto, este capítulo se concentrará na análise do projeto de tetos flutuantes externos, com mais ênfase nos tetos do tipo pontão.



**Figura 4-1 – Tanque com Teto Flutuante Externo em Construção**

A condição de flutuação normal do teto flutuante se caracteriza pelo teto essencialmente plano e no centro do tanque de armazenamento. Nessa condição, o teto deve encostar por completo no líquido armazenado, restando espaço vapor apenas ao redor do perímetro. Não pode haver espaço vapor debaixo do teto flutuante, pois pode afetar a

estabilidade do teto, por isso o teto deve ser dotado de dispositivos de alívio de pressão, para eliminar os gases acumulados entre o lençol central e o produto armazenado.

O teto deve ser construído de tal forma que permita o extravasamento do produto armazenado sem danificar quaisquer de seus componentes, no caso de um enchimento exagerado do tanque.

A chapa de topo do flutuador periférico deve ter uma declividade mínima de 1:64 e o lençol central dos tetos pontão deve ter inclinação suficiente e voltada para o centro do teto para permitir a drenagem das águas pluviais. Essa inclinação também é necessária na chapa superior do teto do tipo duplo, pelo mesmo motivo.

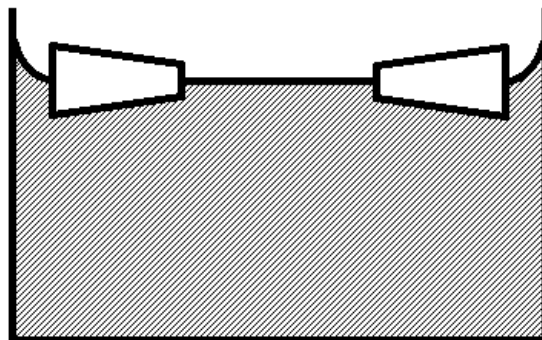
Como mencionado anteriormente, os tetos flutuantes possuem uma grande vantagem pelo fato de se movimentarem junto com a superfície do líquido armazenado, o que reduz drasticamente a perda por evaporação. Apesar dessa economia, esses tetos possuem grande volume morto, pois um nível mínimo de produto deve ser mantido no tanque para que o teto não se choque com os acessórios do costado tanque durante sua movimentação vertical.

Não é possível apoiar o teto nas pernas de sustentação para evitar a existência desse volume morto. O primeiro motivo para esse impedimento é porque dessa forma o teto deixaria de evitar a formação de espaço vapor, mas também por um motivo estrutural. Apoiado sobre as pernas, o lençol inferior do teto sofreria diversos ciclos de carregamento decorrentes dos processos de enchimento e esvaziamento do tanque. Essas inúmeras inversões de curvatura favoreceriam o surgimento de trincas por fadiga, o que pode ocasionar o alagamento de compartimentos do teto que garantem sua flutuabilidade.

Os requisitos mínimos para o dimensionamento de tetos flutuantes estão presentes em duas principais regras aplicáveis a tanques de armazenamento: a API 650 [25] e a NBR 7821 [26]. O anexo C da primeira e o anexo D da segunda tratam do projeto de tetos flutuantes em si. A norma N-270 da Petrobras [31] apresenta requisitos adicionais, definindo, por exemplo, o tipo de teto a ser utilizado em função do diâmetro do tanque, conforme Tabela 3-2.

Em todo caso, é comum às três regras que o teto deve apresentar flutuabilidade suficiente e permanecer flutuando sobre um líquido de densidade relativa de 0,7. Caso o produto armazenado no tanque possua, em sua temperatura máxima de operação,

densidade inferior, o teto deve ser capaz de flutuar nessas condições. Esta é a condição normal de flutuação, representada na Figura 4-2.



**Figura 4-2 – Condição Normal de Flutuação**

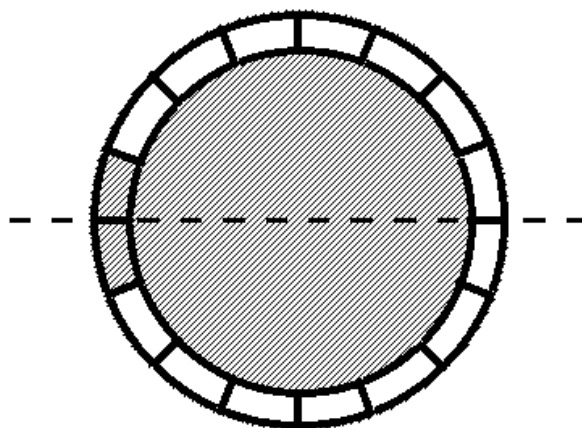
Além da condição de flutuação normal, o teto atenda a duas condições básicas de carregamento, também flutuando sobre a densidade mínima exigida:

- 1) Teto com a carga de 250 mm de altura de água pluviométrica (Figura 4-3);



**Figura 4-3 – Condição de Alagamento 1: Carga de 250 mm de Água**

- 2) Dois compartimentos contíguos e o lençol central alagados (Figura 4-4).



**Figura 4-4 – Condição de Alagamento 2: Dois Compartimentos Alagados**

Para ambas as condições enumeradas acima, o nível máximo de flutuação permitido é o da altura correspondente a 80% do volume do pontão.



A Figura 4-5 mostra a imagem de um teto flutuante do tipo pontão com o lençol central alagado.



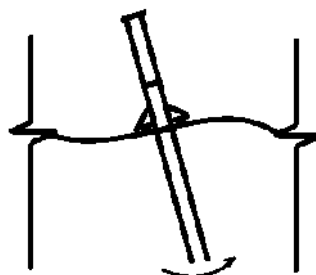
**Figura 4-5 – Teto Flutuante *Pontoon* com Lençol Central Alagado**

Na condição inclinada, o projetista deve garantir que o ângulo de adernamento do *pontoon* não ultrapasse metade daquele responsável por travar a guia antirrotacional.

O teto também não pode apresentar deformações permanentes em decorrência das condições acima citadas. Atenção especial deve ser dada para o caso de tetos pontão, devido à baixa espessura do lençol central.

Outra condição a que o teto está sujeito não é flutuante: durante a manutenção do tanque, o produto armazenado é retirado e o teto se apoia sobre pernas. A altura livre mínima a ser deixada em relação ao fundo, enquanto sustentado pelas pernas é de dois metros. A posição de operação deve ser a mais baixa possível para maior aproveitamento do tanque, mas ainda deve ser compatível com os acessórios e equipamentos do tanque.

Essa condição é muito delicada estruturalmente, pois o chapeamento do teto é composto por chapas muito finas, que podem chegar a ter 4,76 mm de espessura. A Figura 4-6 representa o comportamento do teto quando apoiado.



**Figura 4-6 – Manutenção: Pernas Apoiadas**

Para melhor distribuição da carga no fundo, cada perna de sustentação deve ser apoiada em uma chapa de reforço com, no mínimo, 9,5 mm de espessura e 350 mm de diâmetro, soldada no fundo do tanque.

Também devido à pequena espessura do lençol central, o alagamento do teto causa carregamentos e deformações complexas. Esses deslocamentos induzem forças axiais na parte interna do pontão, levando-o à flexão. As equações que governam esses comportamentos são acopladas e não-lineares, o que resulta em dificuldade de análise.

Diversos autores buscaram formulações e metodologias que pudessem auxiliar na previsão da estabilidade e da resistência estrutural dos tetos estudaram métodos de previsão do comportamento de tetos flutuantes para fins de projeto.

Para o cálculo da flutuabilidade de tetos flutuantes do tipo pontão, as formulações apresentadas por Villas-Boas [38] são simples e eficientes. O cálculo das alturas de submersão tanto na condição normal de operação quanto nas duas condições de alagamento requeridas por norma é feito, primeiramente, considerando-se que o disco central permanece plano e indeformado. Em seguida, se aplicam correções devido às deflexões, o que torna o método simples matematicamente.

Villas-Boas considera tetos do tipo pontão convencional, isto é, sem reforçadores no disco central. Portanto, na condição de alagamento de dois compartimentos do pontão, a inércia considerada é apenas a referente às chapas do pontão. Como no presente trabalho os tetos podem precisar de reforço no disco central, a inclinação do teto calculada pelo método de Villas-Boas pode ser maior do que a inclinação real experimentada pelo teto, devido ao aumento de inércia causado pelos reforçadores. No entanto, trabalha-se com a inclinação máxima permitida, ou seja, uma redução no adernamento do teto não fere as restrições. Por este motivo, a formulação apresentada por Villas-Boas foi considerada satisfatória.

O trabalho de Kuan [2] apresenta o projeto de tanque de armazenamento com tetos flutuantes externos. O foco de Kuan está no tanque de armazenamento como um todo, mas o estudo contém as determinações básicas para a seleção do teto flutuante. Para a estimativa de tensão e deformação no lençol central, Kuan utiliza as formulações propostas por Roark para placas circulares. Essas formulações podem ser encontradas em Warren e Budynas [39] e são as utilizadas neste estudo para a previsão das tensões no teto.

Como consequência das deflexões no disco central, o *pontoon* está sujeito a forças radiais voltadas para o centro, que podem causar flambagem. Para o cálculo de sua

estabilidade estrutural, o pontão é considerado como um anel circular, o que permite a aplicação das fórmulas presentes tanto em Roark [39] como em Timoshenko [40].

Dentre as considerações necessárias para a utilização das fórmulas para anéis circulares, está a de que as forças axiais são aplicadas no centroide da seção transversal do *pontoon*. Apesar de esse não ser o caso para tetos flutuantes, Kuan [2] afirma que, para o caso de pontões finos, a aproximação é válida.

Os demais trabalhos pesquisados sobre tetos flutuantes, utilizaram ferramentas computacionais mais complexas para sua análise estrutural.

Tanto em Epstein [1] quanto em Mitchell [41], as equações que governam deformações e tensões em tetos flutuantes foram solucionadas por meio de integrações numéricas. Os métodos apresentados são iterativos e a resolução de sua condição de equilíbrio requiere o estabelecimento de um conjunto de valores iniciais. A seleção desses valores é difícil e tem grande influência nos resultados. Epstein [1] comenta que, além dos valores das variáveis iniciais, aspectos como o tamanho e a direção dos incrementos aplicados ao método podem influenciar significativamente sua eficiência e os resultados obtidos. Conforme mencionado por Sun et al. [42], Umeki e Ishiwata [43] melhoraram a solução de Epstein [1], substituindo o método de integração pelo de Milne e conseguiram maior eficiência computacional.

Em Yuan et al. [44], é proposto o método de ODE-solver, de resolução de equações diferenciais ordinárias, para resolver a equação de deflexão de tetos flutuantes com *pontoons* periféricos e centrais, com base na teoria da flexão ao invés da teoria de membrana.

Shabani et al. [45] aplicam os princípios variacionais simultaneamente no teto e no fluido armazenado, de forma a facilitar a integração das deflexões de ambos. Seu estudo consiste em avaliar a importância dos componentes de flexão e de membrana nas tensões e deflexões do lençol central. A conclusão é de que a rigidez de membrana pode ser desprezada e ainda obter-se boa estimativa da representação do comportamento estrutural do teto.

Com a evolução das capacidades computacionais, o método de elementos finitos pôde ser explorado nesse campo e estudos como o de Uchiyama et al. [46] e de Yoshida [47] foram desenvolvidos. Nestes trabalhos, o comportamento estrutural dos tetos flutuantes foi analisado por modelos de elementos finitos não-lineares axissimétricos para obtenção de tensões e deformações, conforme citado por Sun et al. [42].

Ainda nas aplicações em elementos finitos, Sun et al. [42] analisa o teto como um elemento 3D, incluindo em seu método elementos como as anteparas do *pontoon*. Além disso, altera a condição de carregamento do teto na condição de alagamento pluviométrico para tetos de grandes diâmetros. Nesses casos, com o nível de água de 250 mm no centro do teto (requerido por regra), a água não ocupa toda a extensão do lençol central.

Os métodos para prever estruturalmente o comportamento dos tetos flutuantes são muitos e de diferentes complexidades e todos foram eficientes em representar o comportamento dos tetos flutuantes.

## 5 Otimização de Tetos Flutuantes

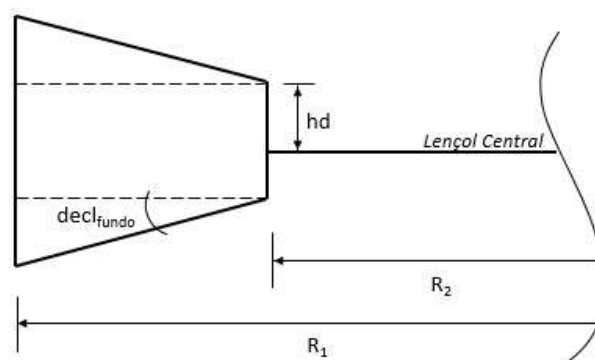
O estudo dos requisitos de projeto do teto flutuante levou à decisão de analisar separadamente as duas condições de apoio do teto.

As três condições de flutuação, em que o teto é sustentado pelo fluido armazenado, foram utilizadas para a otimização da forma geral do teto. O modelo analítico desenvolvido foi otimizado através do algoritmo determinístico GRG não linear.

A condição de manutenção, em que o teto se apoia sobre as pernas de sustentação, é importante para a definição do número necessário de pernas e para a disposição dos reforços do teto. Nessa etapa, a análise do teto por um modelo em elementos finitos é recomendada para melhor representação das deflexões do teto.

### 5.1 Forma Geral do Teto

Para a primeira etapa da otimização, foi utilizado um modelo matemático capaz de prever a flutuabilidade e os esforços do *pontoon* em função de suas dimensões principais. As dimensões principais do teto definidas no modelo foram os raios externo e interno do pontão ( $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente), a declividade do fundo ( $decl_{fundo}$ ), a altura do rim interno em relação ao lençol central ( $hd$ ) e o número de anteparas radiais do *pontoon* ( $N$ ). A Figura 5-1 mostra um desenho esquemático de um corte radial do teto flutuante, indicando as dimensões principais. As anteparas radiais do pontão não podem ser observadas nessa figura. Desses valores, apenas o raio externo do teto não é variável otimizável, pois é dependente apenas do diâmetro do tanque de armazenamento.



**Figura 5-1 – Dimensões Principais do Pontoon**

A representação do pontão para a primeira etapa de otimização foi feita através de um modelo analítico, utilizando as formulações presentes no trabalho do Villas-Boas [38] e

o cálculo de tensão em membranas presente em Roark [39]. As restrições aplicáveis à operação do teto também foram consideradas. Para esta otimização, optou-se pelo método determinístico chamado *GRG Não linear*. A seguir, estão apresentadas as considerações pertinentes à otimização da forma geral do teto flutuante.

Quanto menor o número de variáveis independentes, mais simples o problema. Portanto, a relação entre as variáveis foi bem estudada, determinando aquelas que seriam independentes no processo e estabelecendo relações entre essas e as demais.

Dessa forma, foi possível reduzir o número de variáveis a serem otimizadas, sem comprometer o problema. Algumas variáveis foram fixadas, a fim de diminuir a complexidade, tendo em vista que o estudo de suas relações indicou que não influenciavam significativamente o resultado final.

Quanto às restrições aplicáveis ao projeto de tetos flutuantes, muitos parâmetros são deixados sem limitações, a critério do projetista ou do comprador. Mesmo sem limitações em regra, é desejável que algumas dimensões sejam restritas por questões operacionais, pois não é interessante que o teto seja ótimo estruturalmente, mas que tenha limitações operacionais. Operadores de tanques reais foram entrevistados para que as necessidades operacionais reconhecidas por eles pudessem ser consideradas na otimização estrutural. Um exemplo é a altura do flutuador externo (*pontoon*): alturas menores do que 80 centímetros dificultam ou até impossibilitam a inspeção.

Das quatro condições básicas a serem consideradas no projeto do teto flutuante, o teto está flutuando em três. A condição de manutenção do tanque, com as pernas apoiadas, está sendo considerada irrelevante para um momento inicial de definição das dimensões básicas do teto. A quantidade de pernas necessárias será tratada como uma etapa posterior ao dimensionamento do teto, em que a condição de manutenção passa a ser importante.

Para a condição normal de flutuação, utiliza-se o peso específico do produto armazenado no tanque ( $\gamma_{prod}$ ). Para as condições anormais de flutuação determinadas por regra, deve-se utilizar um peso específico mínimo ( $\gamma_{min}$ ) no valor de 700 kgf/m<sup>3</sup>. Caso o produto armazenado seja menos denso que o mínimo de regra, o peso específico do próprio produto deve ser utilizado nessas condições anormais.

No cálculo dos calados em cada condição, serão considerados os seguintes pesos específicos:

- Condição de flutuação normal:  $\gamma_{prod} = 985 \text{ kgf/m}^3$ ;
- Condições de alagamento: mínimo ( $\gamma_{min}; \gamma_{prod}$ ) =  $\gamma_{min} = 700 \text{ kgf/m}^3$ .

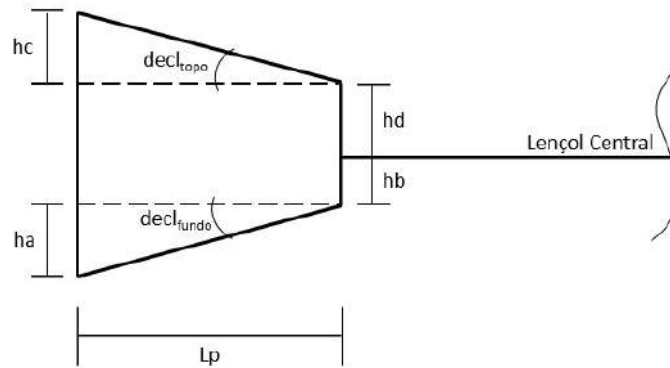
O material do teto flutuante será o aço, cujas propriedades estão listadas a seguir:

- Peso Específico ( $\gamma_{aço}$ ): 7.850 kgf/m<sup>3</sup>;
- Módulo de Elasticidade ( $E$ ): 206.000 MPa;
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ): 0,3;
- Módulo de Elasticidade Transversal ( $Gt$ ): 79.231 MPa.

A otimização do teto flutuante é dependente do tanque de armazenamento que está sendo projetado. Isto significa que o diâmetro do teto é função do diâmetro do tanque. Sua dimensão ( $D_{teto}$ ) é calculada pelo diâmetro do tanque ( $D_{tanque}$ ) subtraído de uma folga entre o costado do tanque e o rim externo do teto. A folga ( $esp_{CT}$ ) está sendo utilizada como sendo de 0,2 metros. Portanto, o diâmetro do teto, que é dado de entrada na otimização do teto flutuante, é dado por:

$$D_{teto} = D_{tanque} - 2 \cdot esp_{CT} \quad (5-1)$$

A seção transversal do *pontoon* tem forma trapezoidal. A Figura 5-2 representa as dimensões adotadas na definição do formato do *pontoon*. São elas: o comprimento do pontão ( $L_p$ ), as bases do trapézio, que se referem ao rim interno e ao rim externo do pontão, e a inclinação dos demais lados da forma (indicadas na Figura 5-2 como  $decl_{topo}$  e  $decl_{fundo}$ ). As alturas dos rins interno e externo foram divididas nas distâncias  $ha$ ,  $hb$ ,  $hc$  e  $hd$ , conforme indicado na figura.



**Figura 5-2 – Dimensões do Pontão**

O raio do rim externo é a metade do diâmetro do teto e está sendo chamado  $R_1$  neste estudo. O raio do rim interno ou raio do lençol central ( $R_2$ ) é uma variável a ser otimizada e o comprimento do pontão é consequência desses dois valores, conforme Equação (

5-2 ). O raio  $R_2$  deve ser maior do que 0 e menor do que  $R_1$ , respeitando um comprimento mínimo de *pontoon* de 0,8 metros, para ser possível sua inspeção.

$$L_p = R_1 - R_2 \quad (5-2)$$

A declividade da chapa de topo do pontão ( $decl_{topo}$  na Figura 5-2) foi fixada em 1/64, que é a declividade mínima para garantir o escoamento de líquidos para o centro do teto. A declividade do fundo, denominada  $decl_{fundo}$ , é variável de otimização.

A inclinação do fundo do *pontoon* influencia no seu centro de carena e, consequentemente, na sua condição de flutuação. Na condição de flutuação normal, é desejável que os esforços devidos à interação entre pontão e lençol central sejam mínimos. Para que isso seja possível, é necessário que o pontão seja capaz de flutuar sozinho, sem o auxílio do lençol central. Neste contexto, a declividade do fundo do pontão tem um limite máximo de 0,07 de forma a evitar que o pontão cause momento no lençol central durante sua condição normal de flutuação. Portanto, a variável  $decl_{fundo}$  é limitada ao intervalo entre 0 e 0,07, inclusive.

As alturas dos rins interno e externo ( $H_{Rint}$  e  $H_{Rext}$ , respectivamente) foram decompostas nas dimensões  $ha$ ,  $hb$ ,  $hc$  e  $hd$ , conforme Figura 5-2 e são calculadas conforme as Equações ( 5-3 ) e ( 5-4 ).

$$H_{Rext} = ha + hb + hc + hd \quad (5-3)$$

$$H_{Rint} = hb + hd \quad (5-4)$$

A altura  $ha$  é consequência do comprimento do flutuador externo ( $L_p$ ) e da declividade do fundo, de acordo com a Equação ( 5-5 ).

$$ha = L_p \cdot decl_{fundo} \quad (5-5)$$

A altura  $hb$  foi considerada fixa no valor de 0 metros. Esse valor foi definido por observação de tetos existentes, em que a posição do lençol central era sempre coincidente com a parte inferior do rim interno.

A altura  $hc$  é consequência da inclinação do topo e do comprimento do *pontoon*, conforme Equação ( 5-6 ).

$$hc = L_p \cdot decl_{topo} \quad (5-6)$$

A altura  $hd$  é variável real não negativa a ser otimizada. Seu valor, em conjunto com o comprimento do *pontoon* e a declividade do fundo, garante a flutuabilidade do teto.



O pontão é compartimentado com anteparas radiais. A quantidade de anteparas do *pontoon* ( $N$ ) é uma variável livre discreta, que foi limitada a no máximo 90 unidades.

Uma das condições anormais de flutuação considera do *pontoon* perfurado, com apenas dois compartimentos alagados. Nesta condição, o teto adquire um ângulo de banda ( $\beta$ ), limitado por regra para garantir o funcionamento da guia antirrotacional. A regra especifica que o ângulo máximo atingido pelo teto deve ser metade daquele necessário para o travamento da guia antirrotacional. Conforme desenhos estruturais da guia antirrotacional, o máximo deslocamento permitido é de 2,5 mm/m. Portanto, o pontão tem um limite de ângulo de adernamento máximo ( $\beta_{max}$ ) de  $0,072^\circ$  para que não haja travamento das guias antirrotacionais.

As espessuras de chapeamento de cada componente do teto são: a do lençol central ( $t_{LC}$ ), a do fundo do *pontoon* ( $t_{fundo}$ ), a do topo do *pontoon* ( $t_{topo}$ ), a do rim interno ( $t_{Rint}$ ), a do rim externo ( $t_{Rext}$ ) e a das anteparas radiais ( $t_{ant\_rad}$ ).

Durante a definição do modelo de otimização, foram feitos diversos estudos com as variáveis a fim de que fossem estabelecidos as relações entre elas e o nível de significância de cada uma na determinação da forma geral do pontão. As espessuras das chapas, invariavelmente, se mantiveram no valor mínimo permitido após a otimização.

Portanto, determinou-se que as espessuras das chapas seriam fixadas nos limites mínimos requeridos para elas. Como consequência, as espessuras do lençol central e as do topo e do fundo do pontão foram fixadas na espessura mínima de regra (4,76 mm). Os rins interno e externo precisam ser mais espessos porque neles são soldados o lençol central e o selo de vedação e eles devem ser capazes de suportar as soldas referentes a eles. Portanto, a espessura do rim interno foi fixada em 8 mm e a do rim externo, em 19 mm.

As variáveis acima mencionadas definem a forma geral do teto pontão. A partir delas, é possível calcular o peso do teto, os volumes deslocados em cada condição, os calados equivalentes e o adernamento do teto para o caso de alagamento de dois compartimentos do *pontoon*. Esses dados permitem a verificação da viabilidade de determinada configuração de teto em função das restrições estabelecidas. Além dos limites individuais de cada variável indicados acima, deve-se garantir que o rim externo não submerge completamente em nenhuma condição de regra. Também é possível estimar esforços no lençol central para verificações de flambagem.

Neste ponto inicial, o peso do teto ( $W_{teto}$ ) é composto pelas chapas do lençol central, do flutuador externo e das anteparas radiais. Como, nesta etapa, não há informação detalhada dos reforços e acessórios necessários, para o lençol central estimou-se um acréscimo de 30% de seu peso e para as chapas de topo e de fundo do pontão o acréscimo considerado foi de 10%. Esse acréscimo de peso também contabiliza a sobreposição de chapas existente na montagem do teto. As Equações ( 5-7 ) a ( 5-12 ) apresentam o cálculo do peso de cada componente do teto flutuante.

$$W_{LC} = (1 + 30\%) \cdot \gamma_{aço} \cdot \pi \cdot R_2^2 \cdot \frac{t_{LC}}{1000} \quad (5-7)$$

$$W_{R_{int}} = \gamma_{aço} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot (h_b + h_d) \cdot \frac{t_{R_{int}}}{1000} \quad (5-8)$$

$$W_{R_{ext}} = \gamma_{aço} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot H_{R_{ext}} \cdot \frac{t_{R_{ext}}}{1000} \quad (5-9)$$

$$W_{topo} = (1 + 10\%) \cdot \gamma_{aço} \cdot \sqrt{L_p^2 + h_c^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(R_2 + \frac{L_p}{2}\right) \cdot \frac{t_{topo}}{1000} \quad (5-10)$$

$$W_{fundo} = (1 + 10\%) \cdot \gamma_{aço} \cdot \sqrt{L_p^2 + h_a^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(R_2 + \frac{L_p}{2}\right) \cdot \frac{t_{fundo}}{1000} \quad (5-11)$$

$$W_{ant_{rad}} = \gamma_{aço} \cdot N \cdot \frac{[H_{R_{ext}} + (h_b + h_d)]}{2} \cdot L_p \cdot \frac{t_{ant_{rad}}}{1000} \quad (5-12)$$

O peso total do teto é a soma do peso dos componentes, conforme Equação ( 5-13 ).

$$W_{teto} = W_{LC} + W_{R_{int}} + W_{R_{ext}} + W_{topo} + W_{fundo} + W_{ant_{rad}} \quad (5-13)$$

O cálculo do calado nas três condições de flutuação é fornecido por Villas-Boas [38], conforme Equações ( 5-19 ) a ( 5-21 ). Para o cálculo desses calados, o volume do pontoon é subdividido em quatro:  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  e  $V_d$ , referentes às alturas  $h_a$ ,  $h_b$ ,  $h_c$  e  $h_d$  respectivamente.

Esses volumes foram calculados seguindo o segundo teorema de Pappus-Guldinus para o volume de sólidos de revolução [48]. Os teoremas formulados primeiramente por Pappus, um matemático grego do século IV d.C., e depois retomados por Guldinus fornecem meios relativamente simples de calcular áreas e volumes de revolução. O cálculo de volumes pelo teorema de Pappus-Guldinus é aplicável para volumes que se originam de áreas rotacionadas ao redor de um eixo que não intercepta a área. O volume gerado por uma área  $A$  à medida que gira de um ângulo  $\alpha$  é igual à área  $A$  vezes o comprimento do caminho percorrido pelo centroide de  $A$ . Se  $p$  é a distância entre o eixo

e o centroide de  $A$ , o volume  $V$  gerado é em decorrência de uma rotação  $\alpha$  é dado pela Equação ( 5-14 ).

$$V = A \cdot \rho \cdot \alpha \quad (5-14)$$

Os quatro subvolumes do pontão podem ser interpretados como sólidos de revolução a partir da rotação das áreas correspondentes na seção radial do *pontoon*. Portanto, o cálculo desses volumes é dado pelas equações a seguir.

$$V_a = \frac{h_a}{3} \cdot \pi \cdot (2 \cdot R_1 + R_2) \cdot (R_1 - R_2) \quad (5-15)$$

$$V_b = h_b \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \quad (5-16)$$

$$V_c = \frac{h_c}{3} \cdot \pi \cdot (2 \cdot R_1 + R_2) \cdot (R_1 - R_2) \quad (5-17)$$

$$V_d = h_d \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \quad (5-18)$$

No cálculo da flutuabilidade do teto foi utilizado o princípio de Arquimedes. O calado  $h_1$  refere-se à condição normal de flutuação. Na condição anormal em que há o alagamento do lençol central e de dois compartimentos contíguos do pontão, o calado paralelo equivalente é dado por  $h_2$ . O calado na condição anormal de flutuação em que há o alagamento do lençol central por uma altura de 254 mm de água pluvial ( $h_{\text{água}}$ ) é dado por  $h_3$ .

$$h_1 = \frac{\frac{W_{\text{teto}}}{\gamma_{\text{prod}}} - V_a - V_b}{\pi \cdot R_1^2} + h_a + h_b \quad (5-19)$$

$$h_2 = \frac{\frac{N}{N-2} \cdot \frac{W_{\text{teto}}}{\gamma_{\text{min}}} - V_a}{\pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)} + h_a \quad (5-20)$$

$$h_3 = \frac{\frac{W_{\text{teto}} + (\gamma_{\text{água}} \cdot h_{\text{água}} \cdot \pi \cdot R_{\text{int}}^2)}{\gamma_{\text{min}}} - V_a - V_b}{\pi \cdot R_1^2} + h_a + h_b \quad (5-21)$$

Na condição em que há alagamento de dois compartimentos do flutuador externo, o calado  $h_2$  deve ser corrigido em função do ângulo de banda resultante. O calado  $h_{2\beta}$  é o maior calado da condição inclinada – Equação ( 5-22 ).

$$h_{2\beta} = h_2 + (R_1 + |x_0|) \cdot \sin \beta \quad (5-22)$$

Obtêm-se o ângulo de banda ( $\beta$ ) e a posição do centro de flutuação ( $x_0$ ) através das equações a seguir.

$$\theta = \frac{2 \cdot \pi}{N} \quad (5-23)$$

$$A = \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \quad (5-24)$$

$$x_0 = \frac{2}{3} \cdot \sin \theta \cdot \frac{R_1^3 - R_2^3}{A \cdot \frac{N-2}{N}} \quad (5-25)$$

$$I_{yy} = \frac{R_1^4 - R_2^4}{8} \cdot \left[ 2 \cdot \pi - \frac{\theta}{90} - \sin(2 \cdot \theta) \right] - \frac{N-2}{N} \cdot A \cdot x_0^2 \quad (5-26)$$

$$\sin \beta = \frac{W_{teto} \cdot x_0}{\gamma_{min} \cdot I_{yy}} \quad (5-27)$$

O maior calado entre as três condições de flutuação não pode ultrapassar o calado máximo de regra ( $h_{max}$ ), correspondente a 80% do volume total estando submerso – Equação ( 5-28 ).

$$máximo(h_1, h_{2\beta}, h_3) - h_{max} \leq 0 \quad (5-28)$$

O teto flutuante deve ser projetado para que haja mínima interação entre o pontão e a chapa do lençol central. No entanto, a deflexão do lençol central gera cargas trativas no *pontoon*, que não devem causar a flambagem do flutuador. A estabilidade do pontão à tração proveniente do lençol central deve ser assegurada para todas as condições de carregamento. A fim de se obter a máxima tração na periferia, considerou-se o lençol central como uma membrana sem resistência flexional. Essa tração pode ser calculada resolvendo as equações 11.11.1 e 11.11.2 de Roark [39] em duas etapas. No primeiro passo, obtém-se o valor de deflexão no centro da membrana ( $y_{LC}$ ), conforme a Equação ( 5-29 ).

$$\frac{q \cdot R_2^4}{E \cdot (t_{LC}/1000)^4} = K_1 \cdot \frac{y_{LC}}{t_{LC}/1000} + K_2 \cdot \left( \frac{y_{LC}}{t_{LC}/1000} \right)^3 \quad (5-29)$$

A tensão sobre a membrana ( $q$ ) é obtida através da pressão hidrostática atuante sobre o lençol central, conforme Equação ( 5-30 ).

$$q = |h_{LC} - h_1| \cdot \frac{\gamma_{prod} \cdot g}{10^6} \quad (5-30)$$

O segundo passo é determinar a tensão na periferia ( $\sigma$ ) devido à deflexão ( $y_{LC}$ ) obtida através da Equação ( 5-31 ).

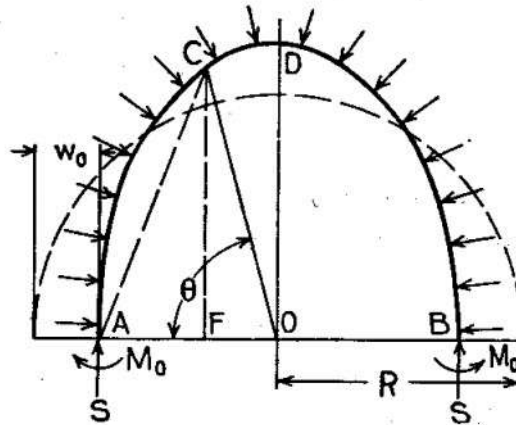
$$\frac{\sigma \cdot R_2^2}{E \cdot (t_{LC}/1000)^2} = K_3 \cdot \frac{y_{LC}}{t_{LC}/1000} + K_4 \cdot \left( \frac{y_{LC}}{t_{LC}/1000} \right)^2 \quad ( 5-31 )$$

A partir da tensão calculada acima, obtém-se a carga de tração do *pontoon* ( $q_{trac}$ ), conforme Equação ( 5-32 ).

$$q_{trac} = \sigma \cdot \frac{t_{LC}}{1000} \quad ( 5-32 )$$

A carga de flambagem do pontão sujeita à tração do lençol central foi obtida através da formulação de Timoshenko [40]. Foram calculadas duas cargas de flambagem do *pontoon*. A menor delas foi considerada como a carga crítica de flambagem.

A primeira delas ( $q_{cry}$ ) refere-se à perda de circunferência do pontão, que toma uma forma oval devido ao carregamento axial. A partir da carga crítica, as deflexões do pontão crescem indefinidamente. Na Figura 5-3, a linha tracejada mostra a forma do pontão não deformado e a linha cheia esquematiza a forma adquirida com o carregamento axial neste modo de flambagem.



**Figura 5-3 – Flambagem do Pontão**

Esta carga de flambagem, calculada através da Equação ( 5-33 ), considera flambagem elástica, mas como o *pontoon* é esbelto, essa suposição é válida.

$$q_{cry} = \frac{3 \cdot E \cdot I_y}{(R_1 - R_2)^3} \quad ( 5-33 )$$

O pontão pode também apresentar deflexões fora do plano para o carregamento axial aplicado. A segunda carga de flambagem considerada ( $q_{crx}$ ) se refere à ondulação do *pontoon* devido à carga axial, conforme calculado pela Equação ( 5-34 ).

$$q_{crx} = \frac{E \cdot I_x}{\left(R_2 + \frac{L_p}{2}\right)^3} \cdot \frac{9}{4 + E \cdot \frac{I_x}{C_t}} \quad (5-34)$$

A rigidez torcional ( $C_t$ ) e as inércias do pontão ( $I_x$  e  $I_y$ ) utilizadas para a obtenção das cargas de tração são calculadas conforme as Equações ( 5-35 ) a ( 5-41 ).

$$I_y = \left[ (h_b + h_d) \cdot \frac{t_{R_{ext}}}{1000} + (h_c + h_d) \cdot \frac{t_{R_{int}}}{1000} \right] \cdot (R_1 - R_2)^2 \quad (5-35)$$

$$I_x = L_p \cdot \frac{t_{topo} + t_{fundo}}{1000} \cdot \left( \frac{\frac{h_a}{2} + h_b + \frac{h_c}{2} + h_d}{2} \right)^2 \quad (5-36)$$

$$C_t = K \cdot G_t \quad (5-37)$$

Onde:

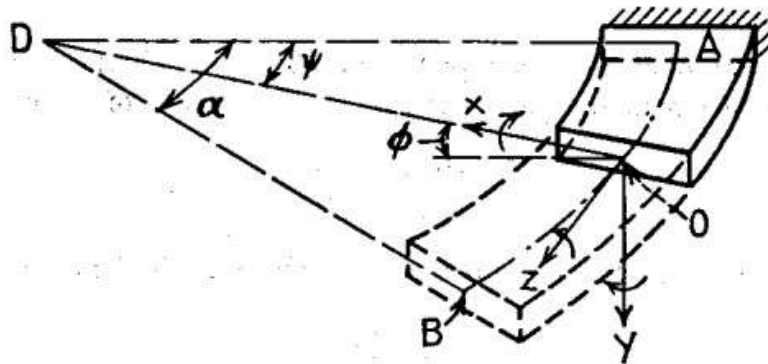
$$K = \frac{4 \cdot A_p^2 \cdot \frac{t_p}{1000}}{U_p} \quad (5-38)$$

$$A_p = L_p \cdot \left( \frac{H_{R_{ext}}}{2} + \frac{h_b + h_d}{2} \right) \quad (5-39)$$

$$U_p = 2 \cdot L_p + 2 \cdot H_{R_{ext}} \quad (5-40)$$

$$t_p = \min(t_{teto}, t_{fundo}) \quad (5-41)$$

Os eixos considerados nos cálculos da inércia podem ser observados na Figura 5-4.



**Figura 5-4 – Eixos X e Y Considerados no Cálculo da Inércia do Pontão (Ref. [40])**

A restrição aplicada ao modelo é a de que a tração no pontão devido à deflexão do lençol central não deve atingir a tensão crítica de flambagem calculada, conforme Equação ( 5-42 ).

$$q_{trac} - q_{cr} \leq 0 \quad ( 5-42 )$$

Em resumo, a otimização das dimensões gerais do teto flutuante do tipo pontão consiste na minimização do peso da estrutura, variando quatro parâmetros e sujeita às restrições de calado, de ângulo de adernamento e de carga de tração. A Equação ( 5-43 ), a seguir, mostra de forma simplificada o problema proposto.

$$\min W_{teto}$$

*variáveis livres:*

$$R_2, h_d, decl_{fundo}, N$$

*restrições:*

$$q_{trac} - q_{cr} \leq 0$$

$$\text{máximo} (h_1, h_{2\beta}, h_3) - h_{max} \leq 0$$

$$\beta - \beta_{max} \leq 0$$

( 5-43 )

Utilizando as condições em que o teto está flutuando sobre o produto armazenado, desenvolveu-se um modelo para a minimização do peso do teto atendendo às restrições operacionais. Nesta etapa de otimização, há a consideração de que os componentes do teto estão devidamente reforçados para esforços locais e o peso referente a esses reforços foi estimado como porcentagens dos pesos de cada componente.

Como as pernas de sustentação não têm função durante a operação, também não fazem parte do modelo de otimização. No entanto, essas considerações são suficientes para a correta representação do comportamento do teto flutuante a fim de selecionar sua forma geral.

O modelo matemático desenvolvido segue as etapas indicadas no fluxograma a seguir (Figura 5-5), conforme a formulação descrita acima.

A partir do ponto inicial, a geometria do pontão está determinada. Com as dimensões do *pontoon*, são calculadas suas propriedades geométricas, como volume e inércia. Essas propriedades são necessárias para a definição e verificação de dois dos critérios. O único critério que independe das dimensões do pontão é o ângulo máximo de adernamento, pois é resultado do limite operacional da guia antirrotacional. O nível

máximo de submersão é definido por regra em função do volume do *pontoon* e a carga crítica de flambagem é consequência de sua geometria e capacidade de resistência.

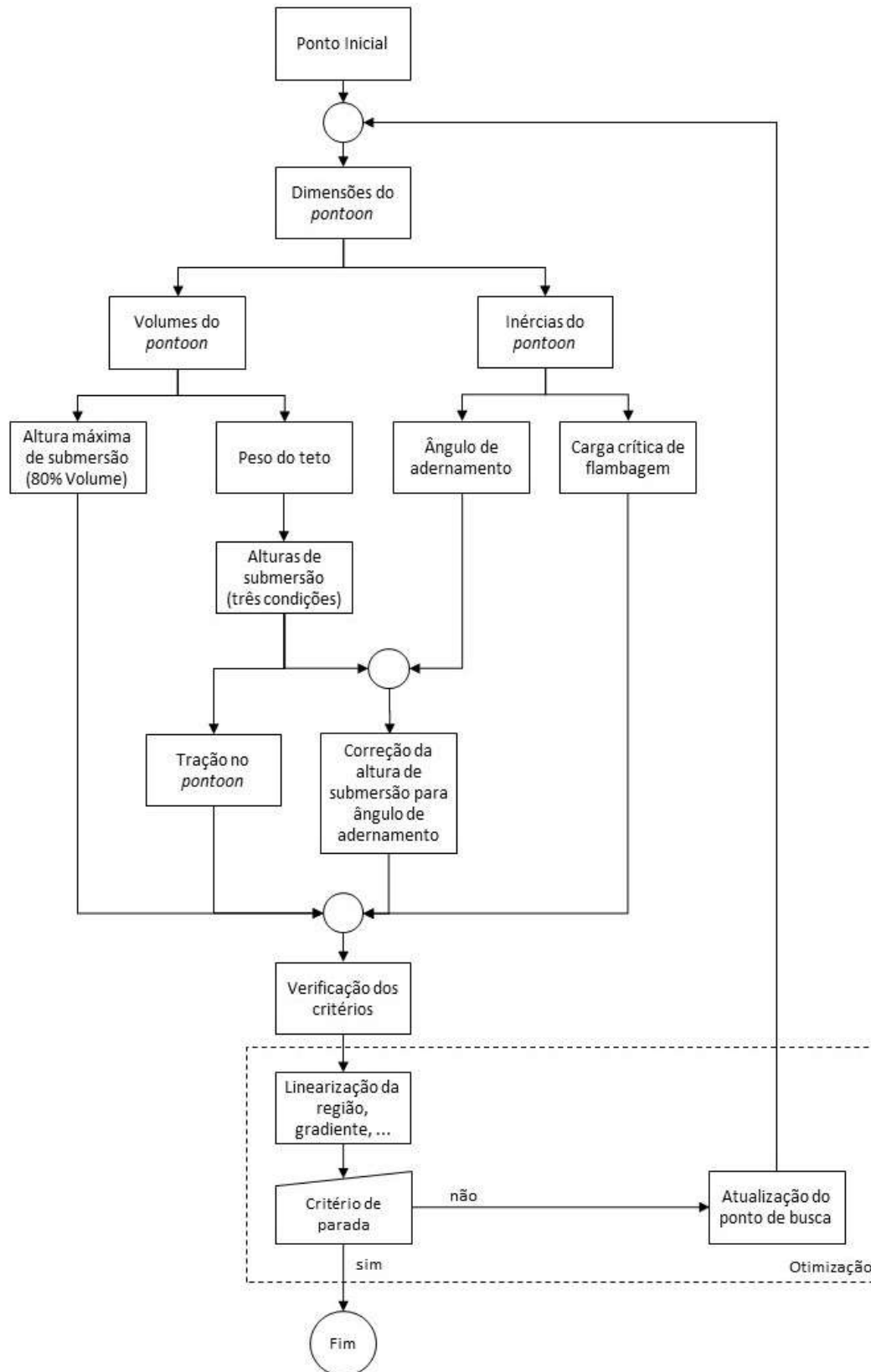


Figura 5-5 – Fluxograma



Quantificados os critérios para a geometria inicial, o peso do teto também deve ser estimado para a verificação da estrutura definida. O peso do teto é fator determinante para o cálculo das alturas de submersão. O volume do flutuador é dividido em quatro subvolumes para facilitar o cálculo desses calados.

O ângulo de adernamento adquirido pelo teto a partir do alagamento de dois compartimentos contíguos do *pontoon* deve ser utilizado para corrigir a altura de submersão calculada para a condição de flutuação que considera essa avaria no teto. Primeiramente a altura de submersão é calculada para o teto em calado paralelo e, a partir do ângulo de banda, ele é corrigido para que possa ser confrontado com o critério de regra para o calado da estrutura. A tração sofrida pelo flutuador também depende do calado do teto, para o cálculo da pressão exercida pelo produto armazenado.

A partir desses cálculos, é então verificado se a geometria definida pelo ponto inicial de busca atende aos critérios de viabilidade do teto flutuante. A etapa final apresentada no fluxograma dentro do quadro “otimização”, pode variar de acordo com o método adotado para a obtenção do teto ótimo. Cada algoritmo possui sua maneira de analisar o problema de forma a decidir se a busca pelo ponto ótimo pode ser encerrada. Além disso, a direção de busca pelo ponto ótimo é determinada diferentemente em cada método de otimização.

O método selecionado para a atualização do ponto de busca neste estudo foi o Gradiente Reduzido Generalizado não linear (GRG não linear).

O algoritmo *GRG não linear* é determinístico e, conseqüentemente, pouco robusto, o que significa que o processo se encerra ao encontrar um ótimo local. Para alguns pontos iniciais, o *GRG não linear* também apresentou problemas de convergência, resultando em soluções inviáveis.

Portanto, para que a ferramenta criada pudesse ser útil para a definição das dimensões iniciais do teto, optou-se por um estudo paramétrico do ponto inicial. Isto é, o algoritmo foi inicializado de diversos pontos, alterando sistematicamente as variáveis livres dentro de seu domínio. Os casos que geraram soluções não viáveis ou não ótimas foram filtrados e obteve-se o comportamento das características principais do teto otimizado em função do seu diâmetro.

Como resultado, foram gerados gráficos das principais dimensões do teto em função de seu raio externo. Os pontos otimizados que representavam mínimos locais, com peso

total acima do peso mínimo encontrado para aquele diâmetro ou que eram inviáveis, foram desconsiderados.

## 5.2 Reforços e Pernas

Numa segunda etapa, a utilização de elementos finitos para análise do teto se torna necessária. As deflexões no lençol central são complexas, difíceis de prever analiticamente e exigem uma análise não-linear. Além disso, a condição do teto flutuando exige um ajuste fino das cargas de empuxo e peso para equilibrar o modelo.

O modelo também deve ser restrito em um eixo vertical para representar a guia antirrotacional. Sua função é evitar que o teto gire em torno de seu eixo e manter o teto centralizado em relação ao tanque, portanto essa região deve estar restrita quanto à rotação no eixo vertical e quanto às translações horizontais.

As condições mais críticas para o lençol central são a com as pernas apoiadas e aquela em que o lençol central está alagado por águas pluviais. Essas condições devem ser consideradas na otimização.

No programa de elementos finitos, é possível determinar quais características do modelo são otimizáveis: área e inércia de vigas e espessura de chapas. O objetivo é a minimização de peso e devem ser colocadas as devidas restrições de tensão e/ou deformação. Como o teto não pode ter deformações permanentes em nenhuma das condições de operação, o teto deve trabalhar em regime elástico, isto é, sem atingir a tensão de escoamento do material.

Definindo o problema de otimização e analisando o modelo de elementos finitos, o próprio programa consegue definir como os escantilhões podem ser alterados a fim de minimizar o peso total.

## 6 Resultados

Na formulação do problema de otimização estrutural para redução do peso total de tetos flutuantes, optou-se por dividir o processo em etapas. A primeira delas consiste na definição da forma geral do teto e a segunda, na seleção dos reforços e do número de pernas para a condição de manutenção.

### 6.1 Forma Geral do Teto

A primeira etapa do processo de otimização de tetos flutuantes visou à definição das dimensões básicas do teto. As dimensões otimizadas do teto são dependentes do diâmetro do tanque de armazenamento a que se destinam. Para que o presente trabalho fosse geral, sem se limitar a um tanque de armazenamento específico, o método descrito no capítulo 4 foi aplicado para diversos diâmetros externos. Foram variados os diâmetros externos do teto flutuante de 20 metros até 100 metros, faixa de diâmetros em que há indicação de uso de tetos flutuantes tipo pontão.

Observou-se no processo que o ponto inicial de busca influenciava fortemente no resultado final da otimização. O método selecionado mostrou-se pouco eficiente para a quantidade de mínimos locais existentes, encontrando inclusive soluções não viáveis. Apesar de ter pouca robustez, é um método de simples implementação e com alta velocidade de convergência.

A forte dependência do ponto inicial de busca para a obtenção do ponto ótimo global requisitou a parametrização das variáveis livres. O estudo determinou que os quatro parâmetros para definição da forma geral do *pontoon* poderiam ser variados conforme Tabela 6-1, para uma busca eficiente no espaço viável, com 240 pontos iniciais para cada diâmetro externo de teto flutuante.

**Tabela 6-1 – Parametrização das Variáveis Livres**

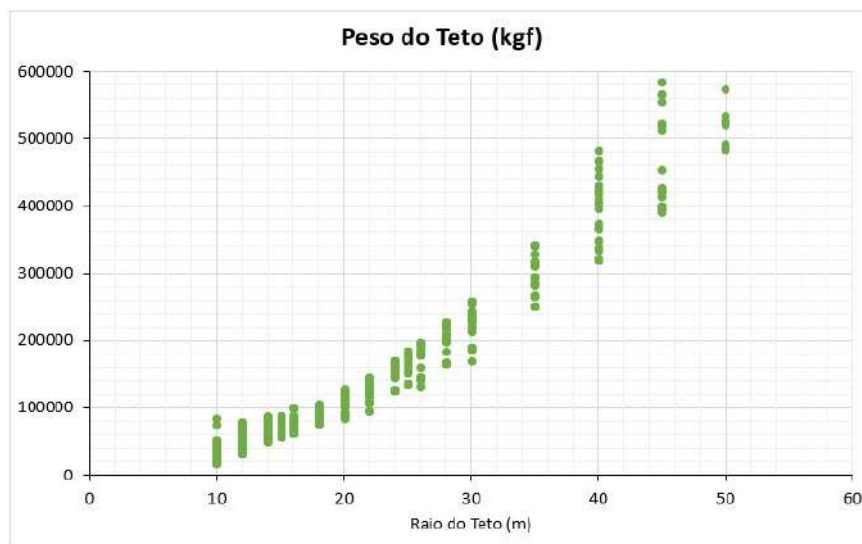
$N$	$R_2$	$hd$	$decl_{fundo}$
3	1% $R_1$	0,0 m	0,00
10	20% $R_1$	0,2 m	0,04
30	50% $R_1$	0,4 m	0,07
50	70% $R_1$	0,6 m	
	99% $R_1$		

A variação do raio interno do pontão ( $R_2$ ) foi colocada em função de seu raio externo ( $R_1$ ), através de um percentual do mesmo. Essa decisão se deve ao fato de que o algoritmo foi aplicado a diversos diâmetros externos de teto flutuante e a definição de

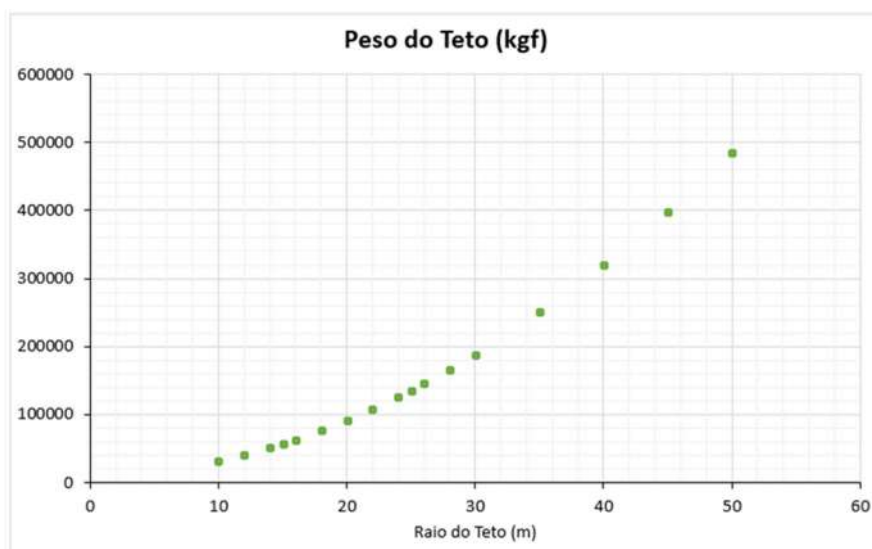
valores absolutos exigiria uma adaptação dos valores para cada um dos diâmetros investigados.

Este estudo parametrizado gerou diversos resultados que se configuram como pontos ótimos locais e algumas soluções encontradas foram inviáveis. A Figura 6-1 apresenta todos os pontos ótimos resultantes da aplicação do algoritmo para os diversos diâmetros de teto e com as variáveis livres parametrizadas. Neste gráfico estão todas as soluções encontradas pelo algoritmo, sendo elas viáveis ou não.

Depois de filtrados os resultados inviáveis e aqueles que não resultavam no menor peso possível para cada diâmetro, obtiveram-se os pontos ótimos globais para cada raio do teto flutuante. A Figura 6-2 apresenta a curva de peso ótimo em função do raio do teto.



**Figura 6-1 – Resultados com todas as Soluções do Algoritmo**



**Figura 6-2 – Resultados dos Pontos Ótimos Finais**

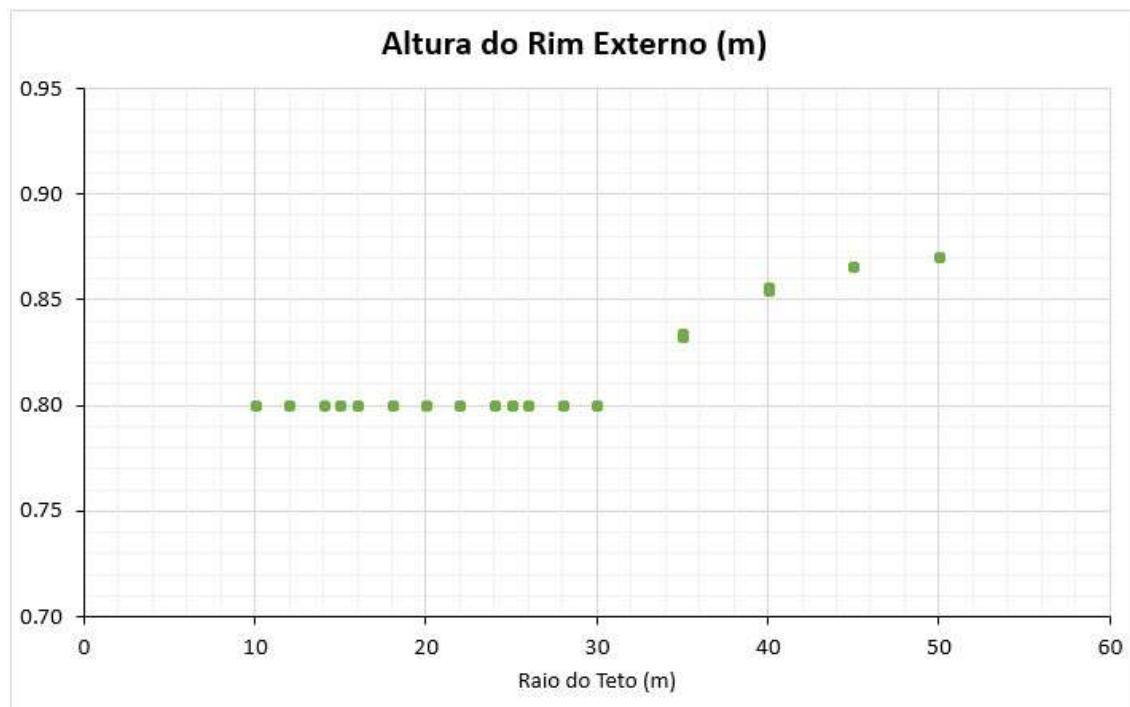
Os gráficos apresentados a seguir (Figura 6-3 a Figura 6-7) mostram as tendências encontradas para o comprimento do flutuador externo do teto, a declividade do fundo do *pontoon*, o número de anteparas radiais e as alturas dos rins interno e externo. Por fim, na Figura 6-8, o peso estrutural estimado para o teto flutuante é dado em função do raio do teto.

O comprimento do *pontoon* ( $L_p$ ) tende a crescer quase que linearmente com o raio do teto ( $R_t$ ). Os valores encontrados variam de aproximadamente 1,5 metros de comprimento para tetos de 20 metros de diâmetro até pouco mais do que 4,5 metros para tetos com diâmetro de 100 metros. O gráfico da Figura 6-3 apresenta os resultados encontrados.



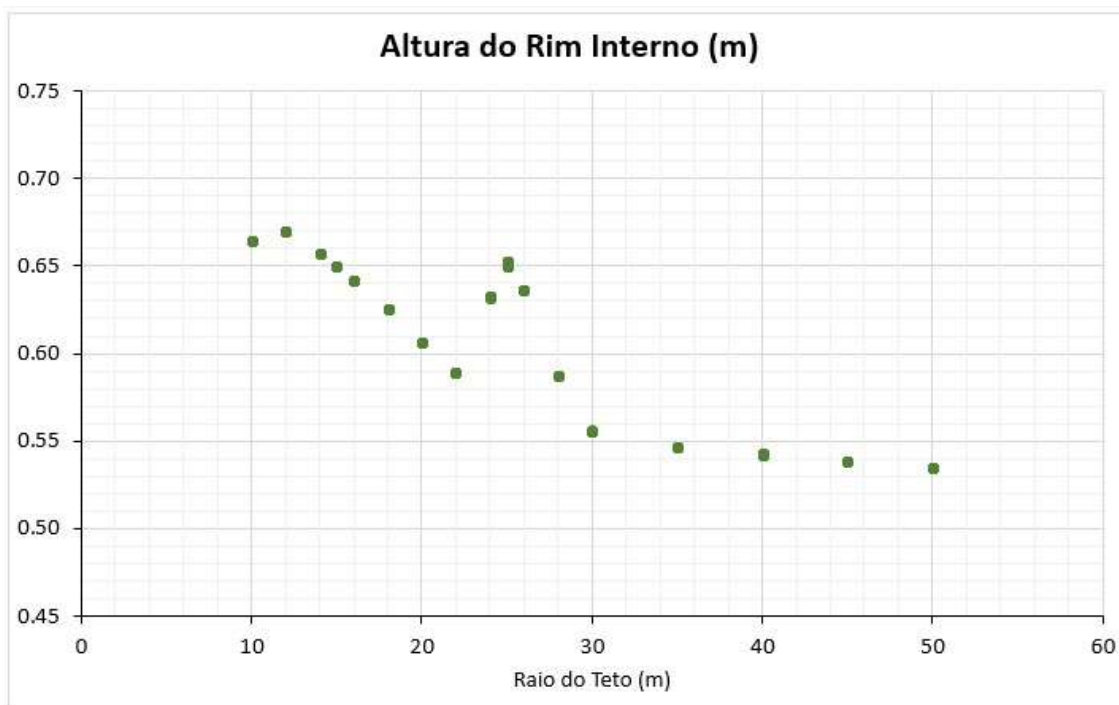
**Figura 6-3 – Comprimento do Pontão vs. Raio do Teto**

A altura do rim externo ( $H_{R_{ext}}$ ) se mostrou limitada ao valor mínimo permitido de 0,8 metros para tetos de até 30 metros de raio. Para diâmetros de teto maiores do que 60 metros, a tendência da altura do pontão é de crescimento, conforme pode ser observado na Figura 6-4.



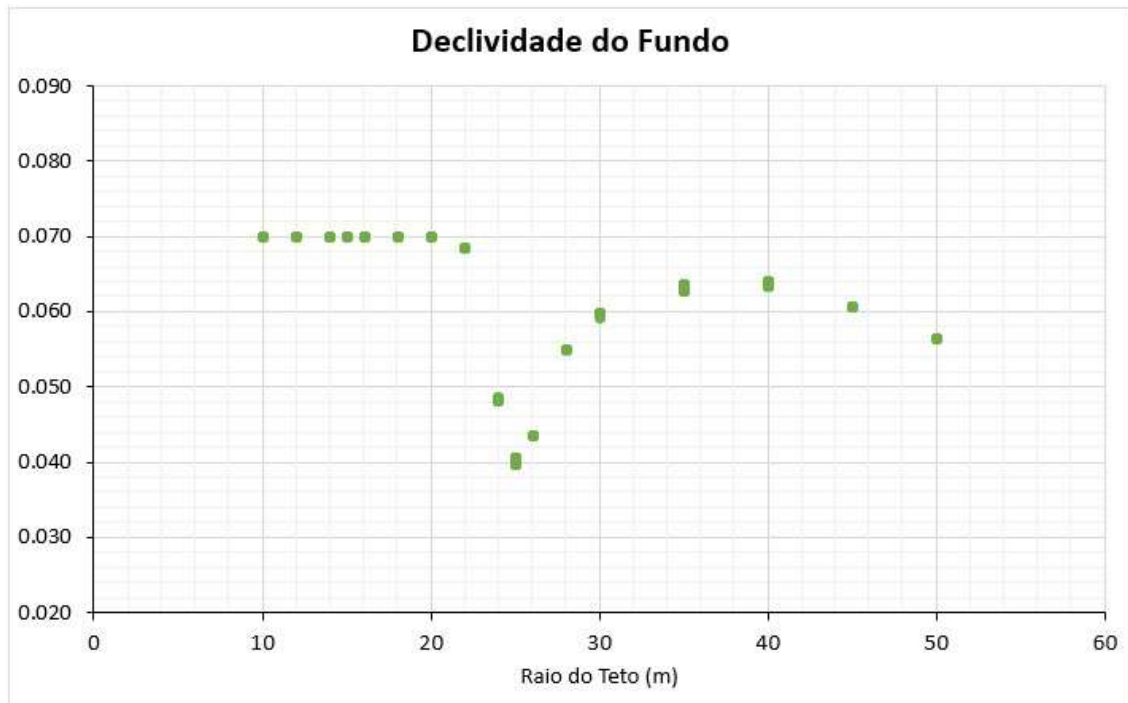
**Figura 6-4 – Altura do Rim Externo vs. Raio do Teto**

A altura do rim interno ( $H_{Rint}$ ) apresenta em geral uma tendência a decrescer com o aumento do raio externo do teto ( $R_1$ ). No entanto, na região entre 20 e 25 metros de raio, a altura otimizada do rim externo sofre um crescimento abrupto, conforme pode ser observado na Figura 6-5.



**Figura 6-5 – Altura do Rim Interno vs. Raio do Teto**

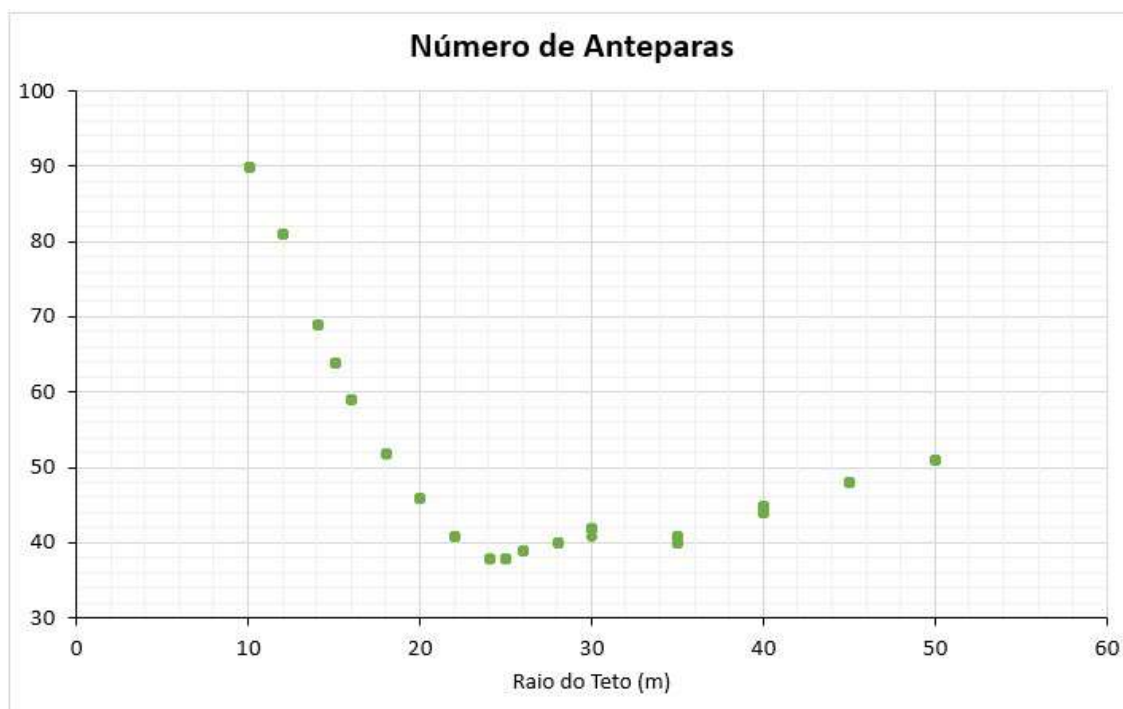
A declividade do fundo ( $decl_{fundo}$ ) acompanha a descontinuidade observada na altura do rim interno, apresentando uma queda brusca entre os raios de 20 e 25 metros. Para diâmetros de tetos menores do que 40 metros, a declividade máxima de 0,07 é limitante. Na Figura 6-6 é possível observar tais comportamentos.



**Figura 6-6 – Declividade do Fundo vs. Raio do Teto**

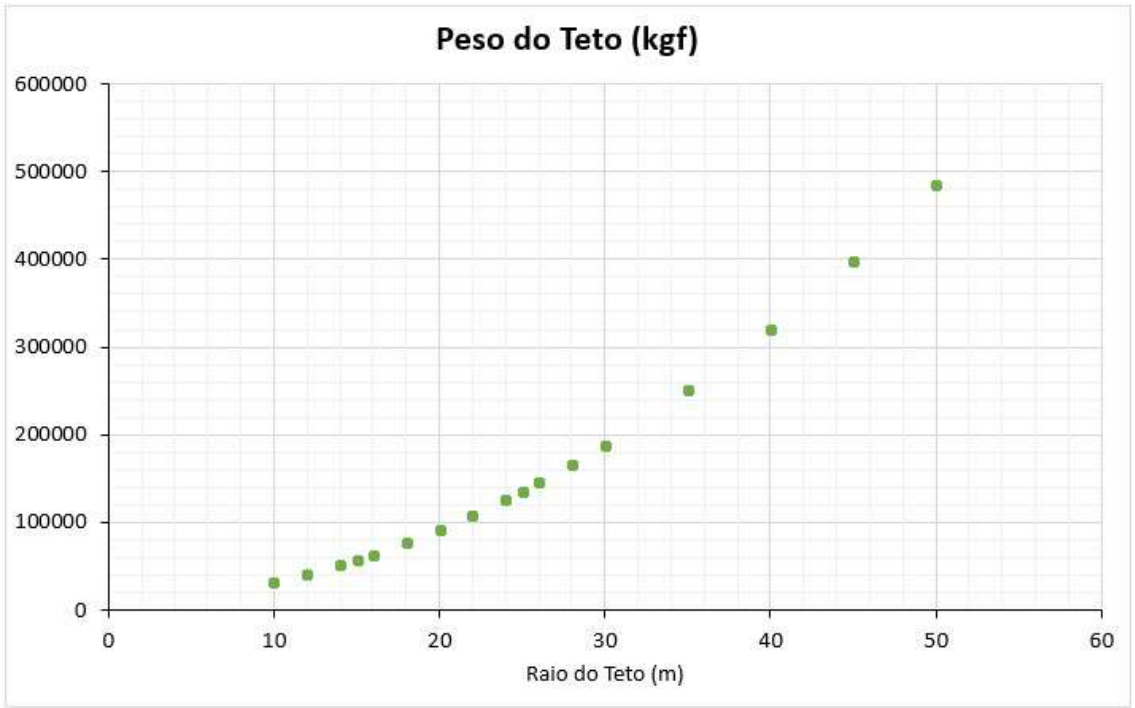


O número de anteparas radiais do teto ótimo apresenta queda até aproximadamente 25 metros de raio do teto e em seguida, leve tendência de crescimento, conforme Figura 6-7.



**Figura 6-7 – Número de Anteparas Radiais vs. Raio do Teto**

A curva de peso otimizado apresentou-se com um comportamento praticamente parabólico, conforme Figura 6-8.



**Figura 6-8 – Peso do Teto vs. Raio do Teto**

Analisando os gráficos obtidos, observa-se que a tendência de crescimento ou decrescimento das curvas apresenta mudanças significativas nas regiões entre 20 e 30 metros de raio. As restrições ativas para cada diâmetro de otimização foram então organizadas na Tabela 6-2, a fim de se chegar a uma conclusão a respeito de tais comportamentos. Na tabela, as restrições que estão ativas para a definição das dimensões do teto para aquele raio estão marcadas em vermelho.

**Tabela 6-2 – Restrições Ativas**

Raio do Teto (m)	10	15	20	22	24	25	26	28	30	35	40	45	50
Altura do Rim Externo	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva
Carga de Flambagem	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa
Calado	Passiva	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa
Ângulo de Adernamento	Ativa	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa
Declividade do Fundo	Ativa	Ativa	Ativa	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva	Passiva

É visível também através dos gráficos que a declividade do fundo é uma restrição ativa até tetos com aproximadamente 20 metros de raio, e o fato desta restrição deixar de ser ativa é sentida pela altura do rim interno e pelo comprimento do *pontoon*. No primeiro,

a curva apresenta um aumento brusco a partir deste valor de raio externo enquanto, no segundo, o comprimento cai levemente.

O ponto de mínimo da declividade do fundo e o consequente ponto de máximo da altura do rim interno para o intervalo entre 20 e 30 metros de raio do teto acontece no momento em que a carga de flambagem do pontão passa a ser uma restrição ativa. A partir de tetos com raio acima de 25 metros e até 30 metros, as curvas apresentam derivadas mais acentuadas.

A suavização das derivadas a partir de 30 metros de raio ocorre pelo fato de que a altura do rim externo deixa de ser uma restrição ativa. A altura máxima do *pontoon* ( $H_{pont}$ ) tende a se manter no mínimo permitido de 80 centímetros em conformidade com o objetivo de diminuição de peso da estrutura. A partir de tetos de raio próximo a 30 metros, essa altura máxima teve de ser aumentada para garantir a viabilidade do teto.

Observa-se através da Tabela 6-2 que o teto ótimo opera com o calado máximo permitido por regra considerando as três condições de flutuação, quando o diâmetro externo é maior ou igual a 30 metros.

Uma última observação relevante é sobre a restrição do ângulo de adernamento. Não é possível chegar a uma conclusão de sua influência nas dimensões do teto a partir da análise de restrições ativas. Isso ocorre porque o fator determinante para a obtenção do ângulo de adernamento do teto é o número de anteparas radiais. Sendo uma variável discreta, o ângulo de adernamento do teto fica constantemente abaixo do ângulo máximo, é raro que o número de anteparas ideal forneça um ângulo de adernamento exatamente igual ao ângulo limite. Na Tabela 6-2 percebe-se que isso ocorre em dois dos pontos analisados apenas. No entanto, uma análise mais ampla dos resultados permite concluir que a restrição do ângulo de adernamento está sempre ativa na otimização da forma geral do teto.

Os tetos otimizados foram confrontados com os tetos existentes para verificação dos resultados da otimização. O peso total dos tetos reais contém os pesos referentes aos reforços estruturais e acessórios do teto. Além disso, não havia informação de peso total de alguns dos tetos reais estudados. Para uniformizar a comparação entre o teto ótimo e o real, optou-se por utilizar o modelo matemático desenvolvido para estimar o peso de todos os tetos, reais e ótimos. Para isso, o peso dos tetos reais foi estimado através da planilha de cálculo de tetos flutuantes desenvolvida neste estudo, alimentando-a com as características principais de cada teto real.

Um dos tetos utilizados para a comparação não apresentou redução de volume. No entanto, as dimensões reais e ótimas não são compatíveis, apesar de próximas. A diferença de peso entre os dois tetos foi de aproximadamente 3,5%. Como as dimensões ótimas foram retiradas dos gráficos gerados, considerou-se desprezível essa variação devido ao provável erro na retirada dos dados. A Tabela 6-3 apresenta a comparação entre os tetos real e ótimo.

**Tabela 6-3 – Comparação sem Redução de Peso**

	Teto A	
	Existente	Ótimo
Diâmetro do Teto ( $2 \cdot R_1$ )	86,19	86,19
Largura do <i>Pontoon</i> ( $L_p$ )	3,81	4,20
Altura Máxima do Teto ( $H_{pont}$ )	0,80	0,86
Altura Mínima do Teto ( $hd+hb$ )	0,46	0,54
Altura do Lençol Central ( $ha+hb$ )	0,20	0,26
Declividade do Fundo ( $decl_{fundo}$ )	0,05	0,06
Número de Anteparas Radiais ( $N$ )	35	46
Peso do Teto ( $W_{teto}$ )	355.712,6	368.225,6

Dois tetos usados para a verificação do modelo tiveram reduções significativas no peso. O teto identificado como “B” apresentou um peso otimizado cerca de 17,5% menor, enquanto a redução para o teto “C” foi ainda maior: 19,4%.

**Tabela 6-4 – Comparação com Redução de Peso**

	Teto B		Teto C	
	Existente	Ótimo	Existente	Ótimo
Diâmetro do Teto ( $2 \cdot R_1$ )	98,10	98,10	72,76	72,76
Largura do <i>Pontoon</i> ( $L_p$ )	12,11	4,65	7,70	2,25
Altura Máxima do Teto ( $H_{pont}$ )	1,16	0,87	0,91	0,80
Altura Mínima do Teto ( $hd+hb$ )	0,60	0,54	0,46	0,61
Altura do Lençol Central ( $ha+hb$ )	0,37	0,26	0,35	0,16
Declividade do Fundo ( $decl_{fundo}$ )	0,03	0,06	0,05	0,07
Número de Anteparas Radiais ( $N$ )	72	51	34	47
Peso do Teto ( $W_{teto}$ )	567.938,5	468.648,8	105.071,6	84.673,2

Observou-se que o comprimento do pontão está superdimensionado nos tetos que sofreram significativa redução de peso após o processo de otimização. O teto “A”, que

não apresentou redução, possui comprimento de *pontoon* de cerca de 4 metros, aproximadamente o estimado para o teto ótimo.

## 6.2 Reforços e Pernas

A segunda etapa de otimização do teto flutuante visa à obtenção do número de reforços e de pernas de sustentação. Nesta fase, o teto deve ser modelado em elementos finitos para a análise mais local das tensões e deslocamentos da estrutura.

A partir da otimização interna do programa utilizado, os escantilhões do teto são otimizados. Para tanto, o teto é modelado com reforços em excesso, deixando as espessuras, inércias e áreas que se desejam otimizar livres para serem alterados até valores próximos de zero. Dessa forma, o programa cria reforços com áreas praticamente nulas, indicando as regiões onde a estrutura está desnecessariamente reforçada.

O programa é capaz de analisar diversas condições de carregamento e de contorno simultaneamente, mas ainda assim o processo é iterativo. Isso acontece por algumas limitações do programa.

A primeira e mais importante delas é a respeito da utilização de elementos de viga na análise. É possível deixar tanto a área quanto a inércia do elemento como variáveis livres, no entanto, o programa não consegue relacionar perfeitamente a diminuição da área seccional da viga com a consequente diminuição da inércia. Apesar de ser possível a redução da área sem alteração da inércia, há um limite físico que não é considerado no programa.

Como o objetivo da otimização interna ao programa é reduzir o peso maximizando a resistência, o resultado são algumas regiões com vigas de área seccional quase nula e inércia muito alta. Isso ocorre porque o cálculo de peso da estrutura está baseado na área seccional da viga enquanto a resistência estrutural é fortemente relacionada à sua inércia.

Portanto, ao utilizar elementos de viga para a representação dos reforços, é necessário um processo iterativo em que se aproveita o resultado anterior para alterar manualmente o modelo antes de nova análise.

Uma alternativa ao uso de elementos de viga para contornar essa limitação é o uso de elementos de placa para a representação dos reforços. Utilizando elementos de placa, o tamanho do reforço deve ser definido e a única variável restante é a espessura da

chapa, que é responsável simultaneamente pelo peso e pela inércia da estrutura. Dessa forma, é possível contornar o problema descrito anteriormente para uma análise inicial.

De qualquer forma, utilizando esse método, a otimização estrutural dos reforços é iterativa, mas ainda eficiente para a previsão dos reforços e pernas para a segunda etapa de otimização.

Na primeira etapa, os resultados apresentados foram gerais, abrangendo toda a faixa de diâmetros de teto que utilizariam tetos flutuantes do tipo pontão. Essa abordagem foi possível devido à maior velocidade de processamento do método implementado.

A complexidade da modelação e da análise da segunda etapa de otimização não torna viável a análise de diversas faixas de diâmetro. Além disso, entende-se não haver relevância em resultados de diferentes diâmetros, visto que o projeto de uma estrutura tem características bastante específicas.

## 7 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo auxiliar no projeto de tetos flutuantes do tipo pontão através de um estudo de otimização estrutural. A necessidade desse estudo foi observada através da compilação dos dados de tetos existentes, de onde observou-se que as geometrias existentes não apresentavam coerência entre si. As dimensões estruturais e a quantidade de reforços, pernas e anteparas não se relacionavam com o diâmetro do teto. A existência de estruturas desnecessárias encarece o projeto, tanto pelo custo com material quanto pela maior necessidade de inspeção e reparo.

A otimização visando à diminuição do peso total da estrutura foi dividida em duas etapas, sendo uma delas para a definição da forma geral do teto *pontoon* e a outra para a determinação dos reforços estruturais e da disposição das pernas de sustentação.

Na primeira etapa, foi utilizado um modelo matemático representando as condições de flutuação e os esforços do teto pontão para a otimização das dimensões principais do teto.

O método GRG não linear é uma escolha prática do ponto de vista de implementação do modelo e de rápida convergência, o que o torna atrativo. No entanto, o método tem problemas de robustez, gerando resultados inviáveis dependendo do ponto inicial escolhido.

A revisão bibliográfica já apontava para essa possibilidade e esse aspecto foi contornado variando sistematicamente as variáveis livres. A otimização foi realizada a partir de diversos pontos iniciais, alguns dos quais permitiram ao algoritmo encontrar a solução ótima enquanto outros geraram soluções não ótimas e/ou não viáveis. Filtrando corretamente os resultados, obtém-se o ponto ótimo.

Como o objetivo dessa primeira análise foi facilitar a escolha das dimensões principais do teto pontão para fins de projeto, este estudo não se deteve a otimizar um caso específico. O teto foi otimizado para diversos diâmetros de tanque de armazenamento e os resultados foram organizados de forma que a estimativa de dimensões principais do *pontoon* pudesse ser obtida a partir do diâmetro do teto.

Essa ferramenta tem muita utilidade para o projeto, principalmente para fins de licitação, onde é importante uma forma rápida e simples de se estimar custos. Os gráficos gerados conseguem de maneira satisfatória atender a esses objetivos.

A comparação com um teto existente mostrou que o teto otimizado apresentou redução de mais de 15% em seu peso estrutural, mostrando que de fato havia margem para melhorias.

A otimização dos reforços e das pernas de sustentação foi considerada como uma segunda etapa de otimização. Nessa fase, é importante a utilização de elementos finitos para a previsão das tensões e deformações na estrutura. Este trabalho discutiu as considerações necessárias à elaboração do modelo, identificando as limitações e as vantagens do método selecionado. Observou-se também que pode haver necessidade de um processo iterativo nesta etapa, entretanto o método descrito é ainda promissor para a otimização dessas estruturas.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Os acessórios tanto do teto quanto do tanque de armazenamento influenciam fortemente na disposição dos reforços e pernas, mas não estão isolados do projeto do tanque como um todo. Essa interdependência das características do tanque e do teto para a definição dos reforços e pernas do teto flutuante exige um estudo mais específico e depende do projeto em que o teto está inserido.

Portanto, a falta de informações de um projeto específico limitaria em termos de resultado esta segunda etapa de otimização. A aplicação do método apresentado seria interessante no caso de, futuramente, essas informações estarem disponíveis.

Além da implementação da segunda etapa de otimização do teto flutuante, a existência de melhores informações sobre os critérios de projeto do teto possibilita maior detalhamento do peso dos acessórios do teto. Na primeira etapa de otimização, foram acrescentados percentuais de peso para representar simplificada os acessórios. Um estudo futuro pode verificar a influência de um melhor detalhamento dos pesos nos resultados encontrados.

O presente estudo também não considerou a verificação da flambagem local das chapas do *pontoon*. A carga crítica de flambagem para os painéis é calculada analiticamente e ajuda a prever a necessidade de inserção de reforçadores para divisão do painel. Essa consideração extra enriqueceria o cálculo e contribui para a estimativa de peso final do teto flutuante.

Outro estudo interessante para complementar este trabalho é a da forma ótima do *pontoon*. O presente trabalho analisou as dimensões ótimas para o flutuador periférico de um teto do tipo pontão. No entanto, a forma básica do *pontoon* foi mantida com seção



trapezoidal. Esse formato é largamente utilizado na indústria, porém este estudo mostrou que as concepções utilizadas podem não estar sendo analiticamente pensadas. Portanto, a investigação de novos formatos e materiais pode encontrar soluções mais vantajosas operacional ou estruturalmente em relação às atualmente utilizadas.

## 8 Referências Bibliográficas

1. EPSTEIN, H. I. **Floating Roof Analysis and Design Using Minicomputers**. Storrs: Department of Civil Engineering, University of Connecticut, 1978. ISBN CT 06268.
2. KUAN, S. Y. **Design, Construction and Operation of the Floating Roof Tank**. University of Southern Queensland. [S.I.]. Out. 2009.
3. BOECHEL, T. **Algoritmo de otimização: uma abordagem híbrida utilizando o algoritmo das formigas e genético**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. ago/2003. Prof. José Mazzucco Junior, Dr. (Orientador).
4. COELLO, C. A.; CHRISTIANSEN, A. D. Multiobjective Optimization of Trusses Using Genetic Algorithms. **Elsevier, Computers and Structures**, v. 775 (2000), p. 647-660, Abr. 1999.
5. DELEULENAERE, A.; BONACCORSI, J.-C.; GUTZWILLER, D. et al. **Multi-disciplinary multi-point optimization of a turbocharger compressor wheel**. ASME. [S.I.]. 2015.
6. KURE, J.; USTO, T. M. K.; CLAUSEN, K. et al. **Parametric Design and Construction Optimization of a Freeform Roof Structure**. Aalborg University. Aalborg, Denmark.
7. SILVA, P. H. R. D.; BRANDÃO, M. A. L. **Alguns métodos clássicos de otimização**. Universidade Federal de Uberlândia. Ituiutaba - MG - Brasil. 2014.
8. NERY, R. S. **Métodos Híbridos para Resolução de Problemas de Programação Não-Linear**. Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, MG. nov/2007. Prof. Vanessa Rolnik Artioli (Orientadora).
9. SARAMAGO, S. P.; STEFFEN JR., V. **Introdução às Técnicas de Otimização em Engenharia**. Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU. [S.I.].
10. CHEN, S.-Y. **Integrating ANSYS with Modern Numerical Optimization Technology - Part I: Conjugate Feasible Direction Method**. FEA-Opt Technology (www.FEA-Optimization.com). [S.I.].

11. TAKADA, T. Multiobjective Optimization of Truss Topology by Linear/Sequential Linear Programming Method. **Journal of Mechanics Engineering and Automation** 2, 2012. 585-593.
12. SACOMAN, M. A. R. Otimização de Projetos Utilizando GRG, Solver e Excel. **XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, Belém, PA, Setembro 2012.
13. DANTAS, O. D.; SILVA, E. M. D.; BARIONI, L. G. et al. Comparação dos Métodos GRG2 (Solver do Excel) e Downhill Simplex para a Parametrização da Função Beta. **XXXIX SBPO**, Fortaleza, CE, Agosto 2007.
14. ROSAL, M. C. F. **Programação Não-Linear Aplicada à Otimização de Redes Pressurizadas de Distribuição de Água**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2007.
15. ESTEVES, E. Regressão não-linear utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel. **Tecnovisão**, v. 18, n. Série Eletrônica, p. 1-13, Junho 2008.
16. BUENO, F. **Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações**. Araranguá: IFSC, 2009.
17. NERY, R. S.; ROLNIK, V. **Métodos híbridos para otimização global não linear**. FFCLRP, USP. Ribeirão Preto, SP.
18. MOBASHER, B.; CHEN, S.-Y.; YOUNG, C. et al. **A Cost Based Approach to Design of Residential Steel Roof Systems**. Arizona State University. [S.I.]. 1998.
19. TOGAN, V.; DALOGLU, A. T. Optimization of 3D Trusses with Adaptive Approach in Genetic Algorithms. **Elsevier, Engineering Structures**, v. 28 (2000), p. 1019-1027, Jan. 2006.
20. CHEN, S.-Y.; RAJAN, S. D. Using Genetic Algorithm as an Automatic Structural Design Tool. **Short Paper Proceedings of 3rd World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization**, Buffalo, NY, v. 1, p. 263-265, Mai 1999.
21. CHEN, S.-Y.; RAJAN, S. D. Improving the Efficiency of Genetic Algorithms for Frame Designs. **Engineering Optimization**, v. 30, p. 281-307, 1998.
22. CHEN, S.-Y.; RAJAN, S. D. A Robust Genetic Algorithm for Structural Optimization. **Structural Engineering & Mechanics Journal**, 10, n. 4, Abr. 2000. 313-336.

23. PEDERSEN, M. E. H. **Tuning & Simplifying Heuristical Optimization**. University of Southampton. [S.l.]. Janeiro de 2010.
24. HO-HUU, V.; NGUYEN-THOI, T.; VO-DUY, T. et al. An Adaptative Elitist Differential Evolution for Optimization of Truss Structures with Discrete Design Variables. **Elsevier, Computers and Structures**, v. 165, p. 59-75, 2016.
25. API. **Welded Tanks for Oil Storage**. API – American Petroleum Institute. [S.l.]. Jul. 2013. (API Standard 650).
26. ABNT. **Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. Abr. 1983. (NBR 7821).
27. O TEMPO. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/cidades/explos%C3%A3o-de-tanques-em-sp-p%C3%B5e-refinaria-de-betim-na-berlinda-1.1024535>>. Acesso em: Setembro 2017.
28. MADE-IN-CHINA.COM. Disponível em: <[http://pt.made-in-china.com/co\\_cimcenric/product\\_Spherical-Storage-Tank\\_hueuhrusn.html](http://pt.made-in-china.com/co_cimcenric/product_Spherical-Storage-Tank_hueuhrusn.html)>. Acesso em: Setembro 2017.
29. ROTO PLAS BRASIL. Disponível em: <[http://www.rotoplas.net.br/nt\\_html/9290-tanque\\_cilindrico\\_polistore\\_fundo\\_conico.html](http://www.rotoplas.net.br/nt_html/9290-tanque_cilindrico_polistore_fundo_conico.html)>. Acesso em: Setembro 2017.
30. FAW-7. Disponível em: <<http://faw7.com.br/aterramento/aterramento-de-tanques-de-armazenamento>>. Acesso em: Setembro 2017.
31. PETROBRAS. **Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico**. CONTEC - Comissão de Normalização Técnica. [S.l.]. Jul. 2013. (N-270).
32. BARROS, S. M. D. **Tanques de Armazenamento**. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras, 2012.
33. ALVES, L. F. F. L. **Tanques de Armazenamento em Concreto Protendido para Petróleo, Derivados e Biocombustíveis**. Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013. Dissertação de Mestrado. Orientador: Ricardo Valeriano Alves, D. Sc.

34. SAEEDLY. Disponivel em: <<http://www.saeedly.com/blog/fixed-and-floating-roof-storage-tanks/>>. Acesso em: Setembro 2017.
35. OIL and Gas Product News. Disponivel em: <<http://www.oilandgasproductnews.com/article/22222/low-density-floating-roof-reduces-tank-vent-emissions>>. Acesso em: Setembro 2017.
36. ANSON INDUSTRY. Disponivel em: <<http://www.ansonindustry.com/how-to-classify-oil-tanks.html>>. Acesso em: Setembro 2017.
37. ATT ADVANCED TANK TECHNOLOGY. Disponivel em: <[http://atttank.com/roof\\_drain\\_system\\_flexible\\_joint\\_articulated.html](http://atttank.com/roof_drain_system_flexible_joint_articulated.html)>. Acesso em: Setembro 2017.
38. VILLAS-BOAS, F. A. M.; COSTA, T. D. Cálculo da Flutuabilidade para Tanques de Armazenamento de Teto Flutuante Tipo "Pontão". **6th Brazilian Symposium of Piping and Pressure Vessels. International Conference on Process Industry Equipment Design, Fabrication, Inspection and Maintenance**, Salvador, BA, Ago. 1990.
39. YOUNG, W. C.; BUDYNAS, R. G. **Roark's Formulas for Stress and Strain**. 7<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: McGraw-Hill International Edition, 2002.
40. TIMOSHENKO. Theory of Elastic Stability. **Artigos 7.4 e 7.10**.
41. MITCHELL, G. C. Analysis and Stability in Floating Roofs. **J Pressure Vessel Technol**, v. 100(2), p. 291-7, Out. 1978. \_\_\_\_1978;100(2);291-7.
42. SUN, X.; LIU, Y.; WANG, J. et al. Stress and Deflection Analyses of Floating Roofs Based on a Load-modifying Method. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Beijing, China, 85, 2008. 728-738.
43. UMEKI, T.; ISHIWATA, M. Deflection and Stress Analyses of Floating Roofs under Rainwater Loading. **Piping Eng**, v. 25(5), p. 64-9, 1985. (em Japonês).
44. YUAN, S.; WANG, J.; ZHONG, H. Analysis of Floating Roofs by ODE-solver Method. **J. Eng. Mech. ASCE**, v. 124 (10), p. 1129-1134, 1998.

45. SHABANI, R.; TARIVERDILO, S.; SALARIEH, H. et al. Importance of the Flexural and Membrane Stiffness in Large Deflection Analysis of Floating Roofs. **Elsevier, Applied Mathematical Modelling**, v. 34, p. 2426-2436, 2010.
46. UCHIYAMA, S.; OKA, T.; OIKAWA, T. The Stress Analysis of Floating Roof in the Petroleum Storage Tank under Rain-Water Load by FEM. **J High Pressure Inst**, Japão, v. 19(2), p. 81-6, 1981. (em Japonês).
47. YOSHIDA, S. Geometrically Nonlinear Stress Analysis of Floating Roofs by Finite Elements Method. **Piping Eng**, v. 25(8), p. 51-7, 1983. (em Japonês).
48. AUDIN M. GEOMETRY. Springer, 2002.
49. ROSA, T. D. O.; LUZ, H. S. Conceitos Básicos de Algoritmos Genéticos: Teoria e Prática. **XI Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins**, Palmas, TO, p. 27-37, 2009.
50. PACHECO, M. A. C. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**. PUC-RIO. [S.I.]. Jul. 1999.
51. ECOTECH. Disponível em: <<http://ecotecindia.com/product/Oil-and-Petrochemical-Industries/MESA-Flexible-Roof-Drain-Systems>>. Acesso em: Setembro 2017.
52. LASDON, L. S.; FOX, R. L.; RATNER, M. W. **Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method**. Case Western Reserve University. [S.I.]. 1973.